



Научный Совет АН СССР по проблемам прочности и пластичности
Головной Совет МВ и ССО РСФСР по механике
Головной Совет МВ и ССО РСФСР по физике твердого тела
Ленинградский Дом ученых им. М. Горького АН СССР
Институт кибернетики АН ЭССР
Институт механики полимеров АН Латв. ССР
Вильнюсский инженерно-строительный институт
Ленинградский госуниверситет им. А.А. Жданова
Ленинградский политехнический институт им. М.И. Калинина
Тартуский госуниверситет

Х семинар

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОЧНОСТИ

по теме

Пластичность материалов и конструкций

23-26 апреля 1985 г.

Т Е З И С Ы Д О К Л А Д О В

Тарту 1985

Научный Совет АН СССР по проблемам прочности и пластичности
Головной Совет МВ и ССО РСФСР по механике
Головной Совет МВ и ССО РСФСР по физике твердого тела
Ленинградский Дом ученых им. М. Горького АН СССР
Институт кибернетики АН ЭССР
Институт механики полимеров АН Латв. ССР
Вильнюсский инженерно-строительный институт
Ленинградский госуниверситет им. А. А. Жданова
Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина
Тартуский госуниверситет

Х семинар

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОЧНОСТИ

по теме

Пластичность материалов и конструкций

23-26 апреля 1985 г.

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Тарту 1985

KUSTUTATUS

Arh.

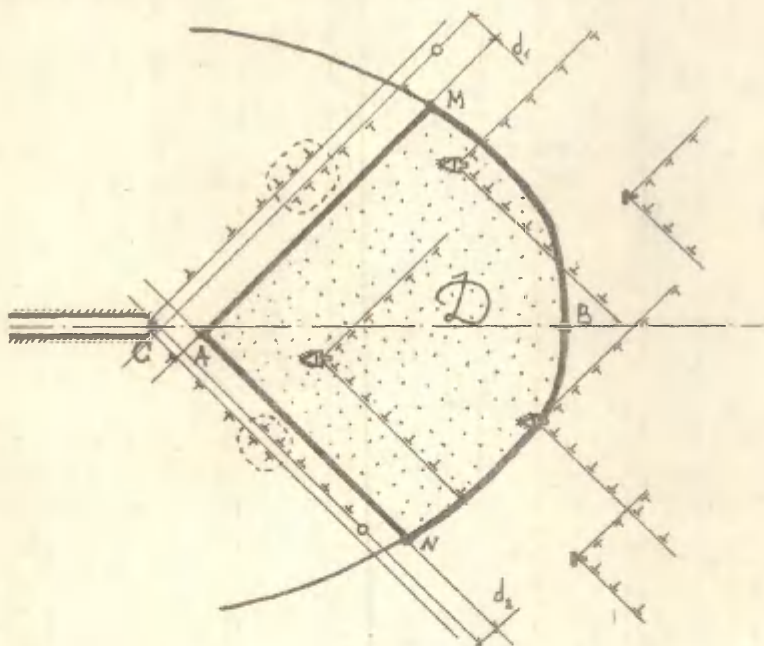
Tartu Riiklik Ülikool
Raamatukogu

8601

ПЛАСТИЧЕСКАЯ ЗОНА ВПЕРЕДИ ТРЕЩИНЫ В ОЦК-МЕТАЛЛАХ В УСЛОВИЯХ ПЛОСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Александров А.В., Степанов И.Е., Волков А.Д.

В настоящей работе предлагается дислокационная модель пластической зоны впереди усталостной трещины в условиях плоской деформации. Модель основана на известных механизмах роста трещин за счет эмиссии дислокаций из вершины и образования субмикротрещин из пересекающихся плоскостей скольжения впереди трещины.



Эмиссия дислокаций из вершины С затруднена вследствие образования комплекса диполей с дислокациями из встречного скопления. Образовавшаяся структура из неподвижных дислокаций препятствует работе соседних источников на расстояниях d_1, d_2 . Следовательно, реакция слияния подвижных дислокаций по механизму Коттрелла

возможна лишь в четверти плоскости, образованной лучами AN, AM .

Развитие супердислокации вплоть до образования неустойчивой клиновидной трещины происходит при выполнении известного условия:

$$-\alpha \Delta W_{n0} - \Delta W_6 + \Delta W_{n.тр.} + \Delta W_\gamma + \Delta W_T \leq 0, \quad (I)$$

где: $\alpha \Delta W_{n0}$ - запасенная доля работы предварительной пластической деформации;

ΔW_6 - описывает релаксацию напряжений после разрыва;

$\Delta W_{n.тр.}$ - работа на пластическую деформацию после разрыва;

ΔW_γ - изменение поверхностной энергии;

ΔW_T - энергия, перешедшая в тепловую.

На кривой \sqrt{BM} в (I) осуществляется равенство. Пересечение двух названных областей образует область \mathcal{D} - геометрическое место точек, в которых возможно образование барьерной дислокации из пересекающихся плоскостей скольжения с последующим развитием неустойчивой клиновидной трещины.

Вероятность скачка магистральной трещины в точку $(\tau, \varphi)_i$ области \mathcal{D} зависит от вероятностей двух независимых (в принятой модели) событий: образования барьерной дислокации P_5 и развития неустойчивой дислокационной микротрещины P_d .

В области \mathcal{D} определена вероятность образования P_5 барьерной дислокации как функция внешних напряжений, характеристик дислокационного ансамбля, частоты превращений дислокаций и условий работы материала.

Показано, что функция плотности вероятности развития супердислокации с критическим вектором Бюргерса из области \mathcal{D} в неустойчивую клиновидную трещину зависит от структуры поликристаллита (размер зерна и его ориентация относительно трещины), исходной дислокационной структуры кристаллита, положения вершины трещины относительно границ кристаллита, температуры испытаний.

Обсуждается возможность описания характерных параметров макромеханики разрушения (скорость роста трещины $\frac{d\sigma}{dN}$, длина скачка магистральной трещины) при помощи параметров микромеханики (плотность и распределение подвижных дислокаций, их взаимодействие с препятствиями в плоскости скольжения и с другими элементами дислокационной структуры) на основе рассматриваемой дислокационной модели.

ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НА ФРОНТЕ ПОЛОСЫ ЛЮДЕРСА-ЧЕРНОВА НА НЕСТАБИЛЬНОСТЬ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ

Андронов В.М., Гвоздииков А.М.

Нестабильность пластического течения кристаллов во многих случаях связана с локализацией пластической деформации на фронте полосы Людерса-Чернова (ПЛЧ).

В работе предлагается модель неустойчивого пластического течения, основанная на анализе напряженного состояния на фронте ПЛЧ, проведенного с помощью моделирования на ЭВМ и методом фотоупругости.

Одноосное растяжение в случае синглетного скольжения приводит к пространственному сложно-напряженному состоянию, характеризующемуся упруго-пластическим изгибом кристаллической решетки, локализованным на фронте ПЛЧ. Вызванные локальным изгибом напряжения имеют величину порядка растягивающих, существенно неоднородны по сечению образца и сконцентрированы на фронте ПЛЧ. Роль указанных напряжений возрастает с уменьшением диаметра деформируемого кристалла.

В качестве объектов для экспериментальной апробации модели были выбраны нитевидные кристаллы (НК). Локализация пластического течения и его прерывистый характер в случае НК определяется совершенством дефектной структуры в недеформированном состоянии. Установлена корреляция между количеством зубцов на кривых растяжения высокого разрешения и числом локально изогнутых областей деформированного НК. Обнаружена зависимость параметров зубцов на деформационной кривой от кристаллографической ориентации НК. Предложены дислокационные механизмы локального упруго-пластического изгиба, приводящего к образованию в деформируемом НК областей незаконно-мерно переориентированной решетки.

На основании модели дано качественное объяснение зубчатой кривой растяжения НК. Проведенный анализ согласуется с экспериментальными результатами, полученными в работе, и имеющимися в литературе данными.

УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ ОБОЛОЧЕК ВРАЩЕНИЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО И КОНИЧЕСКОГО ТИПА С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ

Антонов Е. Н., Дебедев Б. А.

Рассматриваются малые упруго-пластические деформации тонкой оболочки вращения цилиндрического или конического типа, срединная поверхность которой отличается тем, что отклонение её от сопряженной цилиндрической или конической поверхности не превышает 0,2, а кривизна образующей является мало изменяющейся функцией координаты d_1 . Оболочка рассматривается совместно с концентраторами напряжений в виде меридиональных и кольцевых ребер жесткости, размеры поперечных сечений которых соизмеримы с толщиной оболочки, а также сквозных отверстий.

Задача сводится к нахождению приращений компонентов векторов перемещений $\delta u \in \delta U$ точек срединной поверхности оболочки, которые доставляют минимум функционалу приращения потенциальной энергии системы в заданной области ω и удовлетворяют краевым условиям. Бесконечномерное пространство искомым функциям δU заменяется конечномерным δU_k . Для построения конечномерного пространства δU_k область ω дискретизируется на конечное число подобластей ω_k , в пределах которых строятся известные конечномерные функции, аппроксимирующие перемещения и их производные. Таким образом, функционал приращения потенциальной энергии системы принимает вид

$$\mathcal{E}_k(\delta u) = \inf \{ \mathcal{E}_k(\delta v) \mid \delta v \in \delta V_k \}, \quad (I)$$

где δV_k - конечномерное пространство приращения допустимых функций; $\mathcal{E}_k(\delta v) = [a_k(\delta v, \delta v) + b_k(\delta v)] - L_k(\delta q)$; $a_k(\delta v, \delta v)$ - симметричная квадратичная форма; $b_k(\delta v)$ - линейная форма; $L_k(\delta q)$ - потенциал приращения внешних сил, распределенных по области ω_k .

Для вывода функционала приращения потенциальной энергии деформации оболочки используются уравнения состояния Прандтля - Рейсса, записанные относительно приращений напряжений.

Принимая во внимание, что малой деформации оболочки соответствуют малые тангенциальные деформации её объемного элемента и изгибная деформация, которую называют "средней", а также используя гипотезы Кирхгофа-Лява, уравнения связи приращений деформаций с приращениями перемещений принимаются в квадратичном приближении в соответствии с [1].

Учет дискретного расположения ребер жесткости производится

с помощью дельта-функции Дирака. Приращение потенциальной энергии деформации ребер жесткости представляется в приращениях перемещений δu_{pi} ($i=1,2,3$) с учетом изгиба и кручения. Условия неразрывности ребер с оболочкой учитываются в функционале приращения потенциальной энергии системы путем представления δu_{pi} в виде линейных функций от приращений перемещений точек срединной поверхности оболочки.

Наличие сквозных отверстий в оболочке учитывается представлением её толщины в виде разрывной функции

$$h(\alpha_1, \alpha_2) = h(\alpha_1, \alpha_2) - \sum_{j=1}^n h(\alpha_1, \alpha_2) H[f_j(\alpha_1, \alpha_2)], \quad (2)$$

где j – номер отверстия; $H[f_j(\alpha_1, \alpha_2)]$ – единичная характеристическая функция, равная нулю вне контура отверстия.

Неизвестные функции δu , входящие в (1), находятся методом локальных вариаций [2].

В качестве начального приближения принимается численное решение задачи, полученное на основе линейной теории тонких упругих оболочек. Здесь для решения вариационной задачи используется схема МКЭ с кусочно-линейной аппроксимацией для тангенциальных перемещений и аппроксимацией кубической параболой для прогибов. Отыскание минимума полной энергии сводится к решению линейных алгебраических уравнений методом исключения по Гауссу.

По изложенной методике выполнен расчет упруго-пластической цилиндрической оболочки, подкрепленной шпангоутами при внешнем осесимметричном давлении. Построены кривые, ограничивающие критические области (q , МПа; T , кН), соответствующие условию текучести Мизеса и простому нагружению по теории малых упруго-пластических деформаций. Расчетные данные хорошо согласуются с известными экспериментальными данными [3], полученными для гладкой оболочки.

1. Шаповалов Л.А. Об одном простейшем варианте уравнений геометрически нелинейной теории тонких оболочек. – Изв. АН СССР. Механика твердого тела, 1968, № 1, с 56–62.

2. Черноусько Ф.Л., Баничук Н.В. Вариационные задачи механики и управления. М., Изд-во Наука, 1973, 236 с.

3. Гудрамович В.С., Переверзев Е.С. Несущая способность и долговечность элементов конструкций. К.: Наук.думка, 1981, 284 с.

СВЕРХПЛАСТИЧНОСТЬ И СОПРОТИВЛЕНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЮ α -ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Аубакирова Р.К., Пресняков А.А., Байдельдинова А.Н.

Изучалась пластичность некоторых модельных α -сплавов титана с алюминием, ванадием, цирконием, молибденом и ниобием в широком интервале температур и скоростей деформации методами растяжения, кручения и осадки. Обнаружен эффект сверхпластичности в области полиморфного превращения и связанного с ним фазового перехода $\alpha \rightarrow \beta$, который развивается сложным образом с возникновением не одного, а нескольких всплесков удлинения с максимумами около 800° , 880° , 950° и 1000°C .

Прочность исследованных сплавов в области развития сверхпластичности показывает аномальное поведение: снижение ее с нагревом описывается совокупностью экспонент, стыкующихся вблизи $900, 980$ и $+990^{\circ}\text{C}$, свидетельствуя об изменении состояния материала в этих точках. Изучение сопротивления деформированию в процессе пластического и сверхпластического течения выявило различные типы кривых истинных напряжений течения и влияние на их форму фазовых и структурных превращений, протекающих в сплавах в ходе деформации.

Высказано предположение, что сверхпластичность α -сплавов титана представляет собой типичный эффект сверхпластичности превращения, поскольку возникает в температурной области его развития, сопровождается понижением прочности, характеризуется наличием нескольких экстремумов на кривой удлинения, зависит от состояния образцов и кинетических факторов деформирования. Изменение скорости растяжения значительно влияет как на уровень развития сверхпластичности, так и на положение максимумов удлинения на температурной шкале, что связано с действием фактора кинетического соответствия деформации и превращения при возникновении эффекта сверхпластичности. Максимальные показатели пластичности сплавов титана наблюдаются у образцов в горячекованном состоянии или после закалки с высоких температур (из β или $\alpha + \beta$ -области) из-за определяющей роли неравновесности структуры или состава.

Установлено, что переход от растяжения образцов к их кручению в изотермических условиях, т.е. к деформации при "мягкой схеме" нагружения, приводит к сильнейшему развитию сверхпластичности, показатели которой возрастают во много раз, величина момента кручения при этом резко снижается.

ОСТАТОЧНАЯ УПРУГАЯ ДЕФОРМАЦИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ИЗЛОМА КАК КРИТЕРИЙ СВОЙСТВ СТАЛЕЙ С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ УГЛЕРОДА

Барахтин Б.К., Сорокина Л.И., Александрова Т.В.,
Макаров В.В., Шахназаров Ю.В.

В работе приводятся и обсуждаются результаты рентгено-структурного исследования напряженного и деформированного состояния поверхности излома, выполненные с целью установления связи между остаточной упругой деформацией, структурой и характеристиками трещиностойкости сталей 15Х2МНФА, Ст3 ЭП428, 9Х2 и 3Х2М1,5 в вязком и хрупком состояниях. Образцы с исходной усталостной трещиной испытывали на внецентренное растяжение, ударный, статический и циклический изгиб в интервале температур $-100 - +300^{\circ}\text{C}$.

Полученные экспериментальные данные указывают на наличие в приповерхностных слоях излома сильно- и слабдеформированных областей пластической деформации. Зона неустойчивости (микроразрыв) сосредоточена в объемах материала на глубине до 250 мкм при вязком разрушении и до 100 мкм при хрупком. Поскольку размер зерна в металле составлял 20 мкм, процессы пластической деформации вблизи фронта трещины наиболее интенсивно развивались в 3-4 зернах, приводя к возникновению остаточных напряжений.

По величине остаточной упругой деформации $\langle \varepsilon^2 \rangle^{\frac{1}{2}}$ найдено, что при хрупком разрушении локальная пластическая деформация в зоне неустойчивости может достигать 20%, а при вязком разрушении становится более 80%.

Совместный анализ распределения величины $\langle \varepsilon^2 \rangle^{\frac{1}{2}}$ по поверхности излома, его строения с результатами механических испытаний на статический изгиб образцов с трещиной из стали 9Х2 в хрупком состоянии в зависимости от длительности низкого отпуска (160°C) показал, что максимальные значения $\langle \varepsilon^2 \rangle^{\frac{1}{2}}$ ($8 \cdot 10^{-3} - 12 \cdot 10^{-3}$) характерны для длительных выдержек и межкристаллитного разрушения, что может быть связано с большей степенью обособления карбидной фазы (с большей степенью гетерогенности структуры) на второй стадии распада мартенсита по границам зерен. Оптимальным является отпуск длитель-

ностью 40–60ч, когда большим значениям разрушающей нагрузки (P_T) соответствуют большие значения микропластической деформации, притормаживающей развитие трещины.

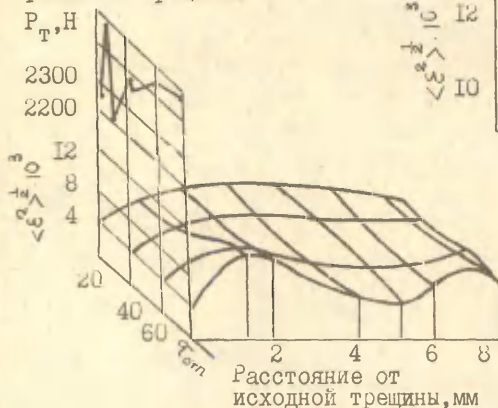


Рис.1. Зависимость разрушающей нагрузки (P_T) при статическом изгибе образцов из стали 9Х2 от длительности отпуска $t_{отп}$ (а) и остаточной упругой деформации от расстояния от исходной трещины при различных длительностях отпуска на НРС 60 (б).

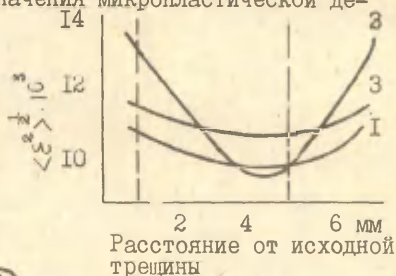


Рис.2. Остаточная упругая деформация в изломе стали 3Х2М1,5Ф в зависимости от расстояния от исходной трещины при различных условиях испытаний:

- 1) при 300°C и нагрузке 1–5 кН, $N=18 \cdot 10^3$
- 2) при теплосменах 150–300°C и той же нагрузке $N=27 \cdot 10^3$
- 3) при теплосменах и нагрузке 4,5–1 кН, $N=28 \cdot 10^3$.

Анализ распределения величины $\langle \xi \rangle^{\frac{1}{2}}$ по поверхности изломов образцов из стали 3Х2М1,5Ф после циклического изгиба (рис.2) показал, что замена постоянной температуры испытания на термоциклирование выявляет пластические свойства материала и приводит к увеличению числа циклов силового нагружения до разрушения образца. Это позволило оптимизировать условия эксплуатации рассматриваемой стали.

Таким образом, результаты исследований показывают, что величина и характер распределения остаточной упругой деформации по поверхности излома могут служить дополнительным критерием оценки свойств материала.

ДЕФОРМАЦИЯ ПЛАСТИЧНОСТИ И ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОСЛЕДЕЙСТВИЯ
ПРИ ТЕПЛОСМЕНАХ В СЛУЧАЕ ЧИСТОГО СДВИГА
Басараба Д.М., Кадобянский Р.Н.

Описание необратимой деформации при циклическом тепловом воздействии может быть осуществлено только в рамках модели с расширенной физической базой. В настоящей работе исследуется одновременно пластичность, ползучесть и деформация температурного последствия материалов с учетом микромеханизма деформирования. Предложен вариант такой модели, основанный на синтезе концепции скольжения, дисперсионной теории и теории упрочнения разупрочнения.

В отличие от теории Батдорфа-Будянского и теории М.А. Леонова в сопротивление сдвигу введена не функция интенсивности скольжения, а функция интенсивности дефектов, связанная с функцией интенсивности скольжений дифференциальным соотношением, показывающим, что при необратимой деформации образуются дефекты и одновременно происходит их релаксация.

Учитывая то, что скорость ползучести при переменной температуре зависит не только от мгновенного значения температуры, в предложенной модели температура вводится не в качестве параметра, а вводится функция, которая учитывает историю температурного нагружения и характеризует напряжения (второго рода), возникающие в теле в результате теплового циклического воздействия.

Результаты аналитических расчетов согласуются с экспериментальными данными при стационарных видах испытаний, при теплосменах в случае чистого сдвига в широком диапазоне интервалов изменения температур и различных уровнях приложенных напряжений.

Полученные соотношения предложенной модели создают необходимые предпосылки для научно-обоснованной оценки работоспособности конструкций в переменном температурном поле.

Разработанный вариант теории неупругой деформации является связывающим звеном между теориями пластичности, ползучести и температурного последствия.

ЛОКАЛЬНАЯ МАКРОСКОПИЧЕСКАЯ ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ
АМОРФНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЛЕНТ, ОБУСЛОВЛЕННАЯ ВОЛНАМИ
НАПРЯЖЕНИЙ

Бенгус В.З., Табачникова Е.Д.

Образцы аморфных сплавов $Ni_{78}Si_8B_{14}$ и $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ в виде лент толщиной 40 мкм и шириной 10 мм деформировали путем одноосного растяжения со скоростью 0,133 мм/мин в интервале температур от 300 до 4,2 К. Относительное удлинение образцов до их разрушения не превышает 1 %. После разрыва на образцах обнаружена локальная макроскопическая пластическая деформация, не наблюдаемая в нагруженных образцах до их разрушения. Она состоит в возникновении макроскопических складок на ленте, которые образуют своеобразный гофр.

Данная работа посвящена металлографическому и визуальному изучению указанного гофра, который характеризуется следующими особенностями.

1. Образование гофра происходит только в образцах материала, обладающих высоким сопротивлением разрыву ($10^{-2} \epsilon$, где ϵ - модуль Юнга).
2. Гофр наблюдается всегда на более длинной части разорванного образца, вблизи захвата.
3. Складки гофра ориентированы приблизительно нормально к оси растяжения образца.
4. Наблюдаются складки, проходящие по всей ширине ленты, а также складки, охватывающие только часть ее ширины, часто на краю ленты. В последнем случае лента дополнительно покороблена по всей длине.
5. Наблюдается корреляция указанных в п.4 разновидностей гофра и ориентации магистральной трещины, определяющей контур разрыва ленты.
6. Высота складок, а также расстояние между ними достигают 1 мм, число складок колеблется от 3 до 8 штук.
7. Каждая складка гофра содержит пучок близко расположенных полос сдвига различных знаков.
8. При очень малой пластичности материала складки гофра чередуются с трещинами, почти параллельными складкам. Наблюдается

также явление разрыва образца на несколько частей, а при полностью хрупком разрушении-деструкция на мелкие осколки (множественное разрушение образца).

Показано, что вся совокупность установленных экспериментальных фактов находит непротиворечивое объяснение как результат пластической деформации ленты при совместном действии упругих волн, которые излучаются возникающей и распространяющейся разрушающей трещиной: продольных волн разгрузки (отражающихся от захвата как волны сжатия) и волн изгиба, существование которых показано в литературе [1]. Так, образование гофра имеет место только в образцах с высоким сопротивлением разрыву, поскольку движение трещины в них происходит с достаточно высокой скоростью, когда выполняется соотношение: $\bar{v} > c \frac{d}{\ell}$, где \bar{v} - средняя скорость распространения трещины, c - скорость продольной звуковой волны, d, ℓ - толщина и длина образца. На короткой части образца гофр не образуется, поскольку еще до окончательного разрушения волны, испущенные трещиной, уходят в более длинную часть образца после отражения от захвата. Ориентация складок гофра определяется направлением фронта волн - перпендикулярно оси растяжения. Полное или частичное расположение гофра по ширине ленты определяется ориентацией изгибающего момента, вызывающего образование волн изгиба. Если ось изгиба лежит в плоскости ленты, то гофр занимает всю ее ширину. Если же ось изгиба не параллельна плоскости ленты, то из-за неустойчивости при таком изгибе наблюдается коробление ленты и распространение гофра только по части ширины ленты. Размер и количество складок в гофре соответствуют оценкам, получаемым в литературе при анализе выпучиваний пластины при продольном ударе [2].

Таким образом, при статическом растяжении металлических стекол наблюдается два проявления упругих волн напряжений: множественное разрушение образца, локальная макроскопическая пластическая деформация в виде совокупности макроскопических складок /гофра/.

1 Mikeowicz J, Journ. Appl. Mech. 1953, 20, №1, p.122-130.

2 Вольмир А.С. Нелинейная динамика пластинок и оболочек.-М., Наука, 432с.

О ПОВЕРХНОСТНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЯХ В ПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРУЮЩИХСЯ СРЕДАХ

Бестужева Н.П., Даринский Б.М.

Рассматриваются вопросы существования поверхностных волн сильного и слабого разрывов в упругопластических телах. Основой для исследования служат модели, предложенные в [1,2]. За пределом упругости полная деформация представлена как сумма упругой и пластической частей. Для определения пластических величин используется предположение о существовании поверхности нагружения. Полная система динамических уравнений включает также соотношения ассоциированного закона течения. Характеристики поверхностных волн определяются совместным решением динамических уравнений, описывающих распространение объемных волн, и граничных условий. На основе представлений о поверхностной волне как совокупности неоднородных волн установлено, что на произвольной границе пластически деформирующегося тела может существовать кривая сильного поверхностного разрыва, распространяющаяся вдоль граничной поверхности со скоростью упругих волн Релея. Получено дифференциальное уравнение переноса, характеризующее изменение интенсивности (величины разрыва) поверхностной волны с течением времени. Проведен анализ решения для конкретного условия пластичности и закона течения. На примере упруго-вязко-пластического равномерно деформирующегося полупространства изучено влияние напряженного состояния, вызывающего пластическое деформирование на изменение интенсивности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ивлев Д.Д., Теория идеальной пластичности, "Наука", М., 1966.
2. Ивлев Д.Д., Быковцев Г.И., Теория упрочняющегося пластического тела, "Наука", М., 1971.

К ВОПРОСУ АНАЛИТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛОВ

Блинов Э.И.

Решается задача аналитического описания связей между деформациями и полями напряжений и температуры в "точке" поликристаллического металлического тела. Эти связи выражают в определенном смысле структурные особенности термоактивируемого поведения термомеханически нагружаемого поликристалла и поэтому при феноменологическом подходе необходимо строиться на основании термодинамических представлений статистического металловедения.

Природу напряжений второго рода, возникающих в термомеханически нагружаемом поликристалле, определяет специфика его структуры независимо от формы изделия и условий его эксплуатации. Для их учета введем в рассмотрение специальную модель поликристаллического твердого тела - микронеоднородную сплошную среду. В рамках этой среды, с учетом случайности процессов, происходящих в зерне как термодинамической системе, и неустойчивости структурных напряжений, приводящей к их релаксации, установлены соотношения между изменениями внешней среды и деформацией в "точке" тела в виде

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ij}^o(t) = & \varepsilon_{ij}^o + Q_o M_{ijkl} [\sigma_{kl}^o(t) - \sigma_{kl}^o] + Q_o L_{ij} [T(t) - T_o] + \\ & + \int_0^t [\sigma_{kl}(\tau) - \sigma_{kl}^o] E_{ijkl}(t, \tau) d\tau + \int_0^t [T(\tau) - T_o] F_{ij}(t, \tau) d\tau, \end{aligned}$$

где ε_{ij}^o , σ_{kl}^o , T_o , Q_o - начальные значения деформации, напряжения, температуры и некоторой скалярной функции, зависящей от

времени: $M_{ijk\ell}$, $L_{k\ell}$ - постоянные материала, зависящие только от структуры; $E_{ijk\ell}(t, \tau)$, $F_{ij}(t, \tau)$ - разностные ядра интегрального уравнения.

Это уравнение, если положить $\sigma_{k\ell} = 0$, определяет деформацию поликристалла только из-за безградиентального изменения температуры, являясь тем самым исходным для определения коэффициента "роста" металлического тела из-за циклических теплосмен. После соответствующих преобразований получаем коэффициент роста в виде

$$\gamma_{ij}(n) = K(1)K(2)\dots K(n) \int_0^5 [T(\tau) - T(0)] F_{ij}(t - \tau) d\tau,$$

где $K(n)$ - отношение $\gamma_{ij}(n)/\gamma_{ij}(n-1)$; 5 - период цикла. При $K(n) = 1$ получаем $\gamma_{ij} = \text{const}$.

Направление "роста" определяется минимальным расстоянием от ненапряженной точки в поле напряжений до поверхности текучести, задаваемой предварительным механическим нагружением тела за предел текучести и может быть назначено заранее. Например, после предварительного закручивания за предел текучести "рост" образца при циклических теплосменах будет происходить путем закручивания его в противоположную сторону.

Минимальный интервал температур, при котором вообще возможен "рост" того или иного материала, определяется путем замены случайных термонапряжений второго рода, из-за которых происходит необратимая макродеформация, эквивалентными им макронапряжениями σ_* , в результате чего $\Delta T_{\min} = \sigma_*/\alpha$, где постоянная α может быть определена экспериментально.

Полученные результаты удовлетворительно описывают имеющиеся экспериментальные данные, изменения формы поликристаллических металлических тел при циклических изменениях температуры.

НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ РАСТЯЖЕНИИ И КРУЧЕНИИ

Борисенко Н.Д., Шахворостова М.И., Пресняков А.А.

Исследовались деформационные, прочностные и кинетические характеристики стали, меди, латуни и других материалов при сложном нагружении. Образцы одновременно с растяжением подвергались кручению.

С увеличением деформации кручения осевое напряжение существенно уменьшается, причем у более прочных металлов эта закономерность проявляется ярче. Особенно интенсивно уменьшается осевое напряжение в период локализации пластического течения.

С ростом сдвиговой компоненты предельные значения продольной и поперечной деформации также падают, хотя полная пластическая деформация возрастает. Эти данные свидетельствуют о том, что объем очага пластического течения возрастает и в нем по сравнению с периодом равномерной деформации более интенсивно происходит перераспределение деформации растяжения в сдвиговую.

Исследование изменения во времени скоростей осевой деформации и кручения показало, что они меняются скачкообразно, причем в противофазах. Другими словами, в любой момент времени, когда интенсивно происходит деформация растяжения, деформация кручения падает и наоборот.

Таким образом, при сложном нагружении ярко проявляется стадийность пластической деформации. Одновременно оба вида деформации не могут иметь одинаковую интенсивность развития. Эта закономерность, обнаруженная при исследовании кривых течения и изменении скоростей деформации в процессе пластического течения, является общей для всех исследованных металлов и сплавов. По размаху амплитуды изменения скоростей периодичность пластической деформации наиболее ярко проявляется в процессе локализации.

Ярко выраженная периодичность изменения скоростей деформации, существенное уменьшение напряжений в заключительный период формирования с ростом отношения сдвиговой деформации к деформации кручения наряду с увеличением объема сосредоточенного пластического течения свидетельствует о более глубоком физическом проявлении локализации деформации при сложном нагружении по сравнению с простым растяжением.

ОБ АКУСТИКОЭМИССИОННОМ ИЗМЕРЕНИИ КОЭФФИЦИЕНТА ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ

Брагинский А.П., Евсеев Д.Г., Медведев Б.М.

К настоящему времени предпринято довольно много попыток применять метод акустической эмиссии /АЭ/ при испытаниях материалов на статическую трещиностойкость. Однако успешным можно считать лишь применение метода для определения начала роста трещины в хрупких материалах. Известная зависимость $N \propto K^4$ между количеством импульсов АЭ и коэффициентом интенсивности напряжений не получила экспериментального подтверждения для пластичных материалов, что связано с некорректностью определения активности характерной для них непрерывной АЭ.

Границу зоны пластической деформации в вершине трещины можно рассматривать как ансамбль независимых излучателей, генерирующих стационарный пуассоновский поток импульсов. Функция спектральной плотности такого излучения, как известно, имеет вид

$$G(f) = N \langle |F(f)|^2 \rangle, \quad /I/$$

где $\langle |F(f)|^2 \rangle$ - средний энергетический спектр отдельного импульса.

Как видно из /I/, спектральная мощность такого излучения при неизменной форме импульсов определяется параметром N . Этот факт может быть использован для достоверных измерений активности АЭ.

Аппаратурно $G(f)$ определяется обычно по набору спектральных компонент, полученных узкополосной фильтрацией АЭ и последующим детектированием.

Для источников типа /I/ повышение активности N приводит к пропорциональному увеличению мощности каждой спектральной компоненты $J^2(f_i)$, так что для определения параметра можно использовать энергию АЭ в узкой полосе частот

$$N(t) = C_1 \int_0^t J^2(f_i, \tau) d\tau, \quad /2/$$

где t - интервал анализа;

C_1 - коэффициент пропорциональности.

Поскольку одновременно с развитием зоны пластической деформации в вершине трещины действуют другие механизмы генерации АЭ, узкая полоса выбирается в диапазоне частот, где доминирует излучение с пуассоновской статистикой.

Проведенные эксперименты на образцах конструкционных сталей с инициированной трещиной, подверженных трехточечному изгибу и внецентренному растяжению, показали, что параметр N , определенный по формуле /2/ в узкой полосе ± 20 кГц, выбранной в диапазоне частот 100 - 300 кГц, действительно пропорционален четвертой степени коэффициента интенсивности напряжений. Отклонение от пропорциональности связано с началом роста трещины. В этот момент измеряется критический коэффициент интенсивности напряжений по формуле

$$K_{Ic} = (C_2 \int_0^T J^2(f, t) d\tau)^{1/4}, \quad /3/$$

где C_2 - коэффициент, определяемый в результате предварительной тарировки.

Рассматриваются зависимости энергии в узких полосах частот от нагрузки в двойных логарифмических координатах по результатам испытаний ст. 30 при различных длинах усталостных трещин и в диапазоне температур от +20 до -60°C. Эти графики сравниваются с теоретической зависимостью $N \propto K_{Ic}^4$. Показано, что тангенс угла наклона линейных участков экспериментальных кривых лежит в пределах 3,85-4,05, т.е. близок к теоретическому значению. Показатель степени для образцов из других конструкционных сталей, определенный по узкополосной энергии АЭ, также близок к 4.

Переход на нелинейный участок графиков энергии в узких полосах частот относительно 100, 150, 200 и 300 кГц практически совпадает и соответствует достижению критического коэффициента интенсивности напряжений.

Увеличение исходной длины усталостной трещины и понижение температуры приводят к возрастанию узкополосной энергии при постоянной нагрузке, следовательно, к увеличению коэффициента интенсивности напряжений.

Данная методика может успешно применяться для определения вязкости разрушения пластичных материалов.

ОБ ИССЛЕДОВАНИИ КЛАССА ЗАДАЧ ПЛАСТИЧНОСТИ ПРИ МАЛЫХ И КОНЕЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЯХ

Бровко Г.Л.

В рамках общей теории пластичности А.А.Ильюшина [1] рассматривается ее частный вариант – теория пластичности малой кривизны [1,2], описывающая часто встречающиеся на практике процессы сложного нагружения упрочняющихся упругопластических материалов с траекториями деформации малой кривизны. Теория малой кривизны, получившая ясное теоретическое обоснование и достаточное экспериментальное подтверждение [1-3], выражается основными соотношениями

$$(*) \quad \bar{S} = \frac{2\sigma_u}{3v_u} \bar{V}, \quad \sigma_u = 3Gs[1-\omega(s)], \quad \sigma = 3K\varepsilon$$

где G и K – начальные модули упругости материала; $S, \bar{S} \equiv S - \sigma I, \sigma_u \equiv \frac{2}{3}t[S^2])^{1/2}, \sigma \equiv \frac{1}{3}t[S]$ – тензор, девиатор, интенсивность напряжений и среднее напряжение соответственно (I – единичный тензор, $t[Z]$ – след тензора Z); $V, \bar{V} \equiv V - vI, v_u \equiv \frac{2}{3}t[V^2])^{1/2}, v \equiv \frac{1}{3}t[V]$ – соответственно тензор, девиатор, интенсивность скоростей деформаций и скорость средней деформации; S и ε – длина дуги траектории деформации и средняя деформация; ω – функция А.А.Ильюшина, описывающая скалярные свойства материала (та же, что и при простой деформации [4]).

Для случая малых деформаций проведено достаточно полное исследование [5] постановок и методов решения основных краевых задач теории, описывающих квазистатическое равновесие начально-изотропного упрочняющегося упругопластического тела под действием медленно изменяющихся во времени внешних механических нагрузок (обеспечивающих во всех точках тела процессы малой кривизны) в изотермических условиях. Даны эквивалентные интегральные формулировки основных краевых задач в виде принципа виртуальных мощностей, а также принципа виртуальных работ, на базе которого введено понятие основного оператора и обобщенного решения краевой задачи (в некотором пространстве абстрактных функций). Исследованы свойства основного оператора (монотонность, непотенциальность и др.) и

доказана теорема единственности, а также установлен принцип экстремума мощности по направлению. Для решения краевых задач предложен метод последовательных приближений (метод семидискретизации) и доказана его сходимость, чем одновременно установлено существование решения краевой задачи теории. Предложены конкретные модификации метода, основанные на различных способах линеаризации расчетных соотношений.

Для случая конечных деформаций на основе одного из следствий постулата макроскопической определимости [6] предлагается вариант изображения процесса в пятимерном пространстве А.А.Ильюшина [1]. В рамках этого подхода выделяется класс траекторий деформации малой кривизны (асимптотически переходящих в траектории того же класса при малых деформациях), для которого основные определяющие соотношения, получаемые как следствие из общей теории, представляются в виде (*). Приводятся две эквивалентные формы постановки основных краевых задач: в начальной (недеформированной) и актуальной (деформированной) конфигурациях (в терминах соответствующих тензорных характеристик напряженно-деформированного состояния), подходящие для исследования корректности и построения методов решения задач соответственно с лагранжевой и эйлеровой точек зрения на движение сплошной среды.

Литература

1. Ильюшин А.А. Пластичность. Изд-во АН СССР, М., 1963.
2. Ильюшин А.А., Ленский В.С. О соотношениях и методах современной теории пластичности. В сб.: "Успехи механики деформируемых сред". "Наука", М., 1975, с.240-255.
3. Ленский В.С. Исследование пластичности металлов при сложном нагружении. Автореф. докт.дисс., МГУ, М., 1961.
4. Ильюшин А.А. Пластичность. ГИИЛ, М.-Л., 1948.
5. Бровко Г.Л. Анализ постановки и методы решения краевых задач теории упругопластических процессов малой кривизны. Автореф. канд.дисс., МГУ, М., 1978.
6. Ильюшин А.А. Механика сплошной среды. Изд-во МГУ, М., 1978.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГИБКИХ АНКЕРОВ С ПОЛЗУЧИМ ОСНОВАНИЕМ

Буслов А.С., Кучеренко Л.М., Топоровская Б.И.

В расчетах гибких анкеров, подпорных стенок, свайных рядов, взаимодействующих с ползучим основанием, необходимо иметь зависимости, связывающие движение ползучего откоса с действующим напором.

В случае плоской задачи для напорной поверхности четверть-полюсы такая задача получена А.Я.Будиним при упрощающих предпосылках пренебрежения инерционными силами в исходном уравнении Навье-Стокса.

В случае пространственной постановки задачи, что имеет место при одиночных сваях и анкерах, решение усложняется необходимостью учета инерционных членов в исходном уравнении движения.

Такая задача решается как в строгой постановке, так и в приближенной инженерной форме.

В строгой постановке задачи Навье-Стокса с начальными и граничными условиями в перемещениях и напряжениях при учете прилипания на контактных поверхностях решается аналитически путем применения преобразования Фурье и Лапласа. Получены уравнения скорости и деформирования напорной полуплоскости.

В упрощенной инженерной постановке решение ведется на основе дифференциальной зависимости между силами инерции и силами сдвига. Результаты получены в аналитической форме.

Полученные закономерности использованы путем подстановки их в уравнение упругой линии в решении задачи гибких анкеров с ползучим основанием.

ДИНАМИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ТОНКИХ ОБОЛОЧЕК ВРАЩЕНИЯ ИЗ УПРУГО-ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Вервейко Н.Д.

В классической теории упругости [1] показано, что в слоях при плоском напряженном состоянии в материале имеют место два типа волн - продольные и сдвиговые. Причем за продольными волнами материал изменяет свой объем за счет продольной и поперечной деформаций. В [2-3] показано, что такие волны могут быть ассоциированы с волнами пластического деформирования при импульсном нагружении пластин, и это позволяет дать оценку динамическому деформированию оболочек с учетом пластических необратимых эффектов.

Рассматривается случай импульсного нагружения давлением тонких оболочек вращения таким образом, что динамическое деформирование происходит не за время действия импульса давления, а за счет инерции движения материала с начальной скоростью $V_0 = J_0 / \rho h$, где J_0 - импульс давления, ρ - плотность и h - толщина оболочки. Предполагается, что материал обладает упругими, вязкими и пластическими свойствами, причем напряжения на пластических деформациях удовлетворяют условию пластичности Мизеса.

Квазилинейная система уравнений в частных производных гиперболического типа для случая плоского напряженного состояния допускает возможность распространения ударных волн двух типов: продольных, распространяющихся со скоростью $C_n = 2C_s \sqrt{1 - (C_s/C_n)^2}$, и сдвиговых, распространяющихся со скоростью C_s , где $\rho C_s^2 = \mu$ и $\rho C_n^2 = \lambda + 2\mu$; λ, μ - упругие параметры Ляме.

При этом на продольной волне имеют место скачки продольной скорости U_n , продольной деформации $u_{n,n}$, поперечной деформации $u_{n,n}$ и объемной деформации e .

$$[e] = \frac{2\mu}{\lambda + 2\mu} [u_{n,n}] = -\frac{2\mu}{\lambda} [u_{n,n}] = -\frac{2\mu}{\lambda + 2\mu} \cdot \frac{[u_n]}{C_n} \quad (1)$$

Развивающаяся в оболочке осесимметричная продольная волна несет на себе превышение (скачок) скорости и деформации, изменяющиеся по закону

$$[v_z] = [v_z]_0 \sqrt{\frac{z_0}{z_0 + z}} \cdot e^{-\alpha z} + A k \frac{e^{\alpha z}}{\sqrt{z_0 + z}} \int_0^z \sqrt{z_0 + z(\eta)} e^{\alpha \eta} d\eta, \quad (2)$$

где z — путь, пройденный ударной волной по оболочке вдоль оси z , z_0 — начальный радиус оболочки, $z(\eta)$ — текущий радиус оболочки, k — предел пластичности.

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \left(\frac{c_s}{c_n} \right)^2 \cdot \frac{4\mu}{c_n} \cdot \frac{(\lambda + 2\mu)^2 + \frac{1}{3}\mu^2}{(\lambda + 2\mu)^2}; \quad A = \frac{\alpha (\lambda + 2\mu)}{2\mu \sqrt{(\lambda + \frac{2}{3}\mu)^2 + \frac{1}{3}\mu^2}}.$$

Как следует из (2), скорость течения материала оболочки за продольной ударной волной меняется: за счет изменения геометрии ударной волны при ее распространении (на пластине $z = z$, а на цилиндре $z = 0$); за счет вязкопластической диссипации как $e^{-\alpha z}$, где $\alpha \sim \frac{1}{z}$, так что при малой вязкости происходит существенная диссипация на пластических деформациях, а при большой вязкости материал ведет себя более упруго и скорость течения материала меняется только за счет изменения геометрии фронта волны. Второе слагаемое в (2) дает скорость за плоской упругой волной нейтрального деформирования.

Развивающиеся деформации, а также необратимые пластические деформации за фронтом продольной волны затухают от пройденного волной расстояния как $e^{-\alpha z}$, но могут увеличиваться в случае сходящейся ударной волны за счет ее фокусировки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новацкий В. Теория упругости, Мир 1975, 872 с.
2. Вервейко Н.Д. Упругие волны в тонких оболочках. Тр. НИИМ ВГУ, 1975, вып. 21, с. 18-20.
3. Грушевский А.В. Распространение волн в тонкой полосе и определение динамического предела текучести листовых материалов при импульсной нагрузке "Кузнечно-штамповочное производство", 1976, № 8, с. 21-25.

ПРОЯВЛЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ СЛОЖНОМ НАГРУЖЕНИИ

Викторов В.В., Степанов Л.П.

Приводятся результаты экспериментального исследования упругопластического деформирования стали при сложном нагружении по траекториям в виде двухзвенных ломаных. Испытания проводились при комнатной температуре на установке "Инстрон-1275" на тонкостенных трубчатых образцах из стали 30ХГСА при нагружении их осевой силой и внутренним давлением (Рис. 1а) или осевой силой и крутящим моментом (Рис. 1б и 1в)

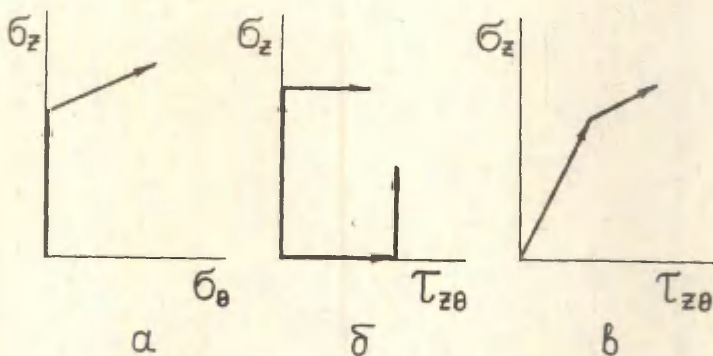


Рис. 1.

Однотипные программы, заданные в напряжениях, были выполнены при различных скоростях нагружения с длительной выдержкой или без выдержки при постоянной нагрузке в точке излома траектории нагружения. Показано, что характер деформирования после изменения направления нагружения существенно изменяется в зависимости от реализации заданной программы нагружения во времени. При этом влияние временных эффектов носит локальный характер, т.е. по мере удаления от точки излома траектории нагружения на втором её звене получае-

мая траектория деформации перестает зависеть от истории реализации программы нагружения во времени (скорости нагружения на первом звене, наличия или отсутствия выдержек при постоянной нагрузке).

Одновременно с этим были изучены временные эффекты при пластическом деформировании стали в случае одноосного ступенчатого растяжения (рис. 2а). Наблюдаемые при этом явления "задержки пластического деформирования" (рис. 2б) при резком увеличении скорости нагружения и ползучести при постоянной нагрузке (рис. 2в) позволяют объяснить неоднозначность результатов, получаемых при различной реализации во времени одной и той же программы сложного нагружения.

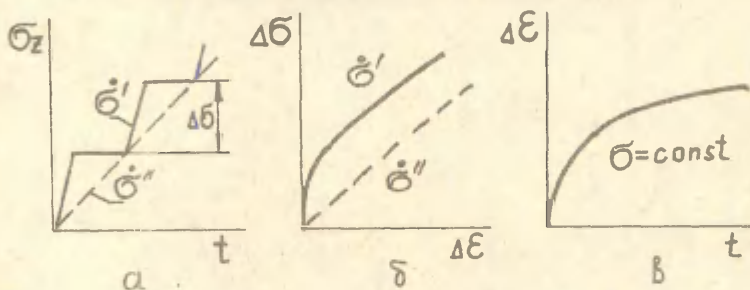


Рис.2.

Таблицы с экспериментальными данными приведены в работах:

1. Вавакин А.С., Викторов В.В., Механикова И.М., Мохель А.Н., Салганик Р.Л., Степанов Л.П., Христианович С.А. Экспериментальное и теоретическое изучение влияния временных эффектов на пластическое деформирование сталей при комнатной температуре. Препринт ИПМ АН СССР, №211, М., 1983, 62с.
2. Вавакин А.С., Мохель А.Н., Степанов Л.П. Исследование характера пластического деформирования стали 30ХГСА в точках резкого излома траектории нагружения (Р-М опыты). Рукопись деп. в ВИНТИ, № 2895 - 83, 1983, 102с.

ПРИМЕНЕНИЕ СТРУКТУРНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ СТАЛИ

Виноградова Т.П., Загряцкий Н.И., Коротких Д.Г.

При термообработке стали в широком диапазоне меняются теплофизические и механические характеристики вследствие структурно-фазовых превращений. Элементарные объемы, на которые условно разбивается термообрабатываемый образец, включают ряд разнообразных структурных составляющих, в общем случае находящихся в неодинаковых условиях нагружения. Поэтому при описании свойств такого конгломерата микрочастиц необходимо учитывать микронеоднородность строения реальной среды. Среди расчетных моделей, построение которых связано с концепцией микронеоднородности реальных материалов, особое место принадлежит структурным моделям.

Полагается, что в начальный момент времени образец находится в условиях стабильного расположения всех его элементов. С этого момента он подвергается внешнему воздействию, меняющемуся во времени. Для аппроксимации процесса образец разбивается на элементарные объемы.

Каждый элементарный объем в свою очередь считается состоящим из различных частей-фаз. С позиции структурных моделей фазы могут быть представлены как подэлементы, которым свойственны изотропное и трансляционное упрочнение и ползучесть. Подэлементы представляются в виде сплошной изотропной среды со своими реологическими свойствами, имеют произвольную форму, размеры и случайную ориентацию. Грани-

цы подэлементов совпадают с границами раздела фаз и перемещаются вследствие фазовых превращений или силового воздействия. При исследовании равновесия или изменения состояния пренебрегаются всеми преобразованиями, которые могут классифицироваться как зарождения новых фаз, пор или петель дислокаций. Подэлементы подвергаются одинаковой общей деформации.

Рассматривается несвязная термомеханическая задача. Сначала решается краевая задача теплопроводности. Теплофизические характеристики подэлементов, составляющих элементарный объем, принимаются одинаковыми, поэтому одинаковы их температуры в любой момент времени, но тепловые и структурные деформации (они не разделяются между собой) различны. Температура входит в качестве аргумента в функции, определяющие размеры поверхности нагружения, а также её трансляцию при пластическом деформировании. После определения температурного поля формируется и решается краевая задача механики твердого деформируемого тела.

Применяется вариант структурной модели среды, обладающий как склерономными, так и реономными свойствами. В пространстве девиаторов напряжений для каждого подэлемента существует своя поверхность текучести, перемещающаяся и изменяющая свои размеры. Поверхность нагружения принимается в форме Мизеса. Неоднородность характеризуется также различием модулей упругости.

На основе предлагаемой структурной модели рассчитано напряженно-деформированное состояние при закалке и отпуске длинного сплошного цилиндра. Получено удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными.

БИФУРКАЦИЯ МОМЕНТНОГО СОСТОЯНИЯ ТОНКОЙ ОБОЛОЧКИ С УЧЕТОМ СЖИМАЕМОСТИ МАТЕРИАЛА

Возианов А. Н.

Предлагается модель бифуркации моментного состояния тонкостенной оболочки. В исходном состоянии материал оболочки в отдельных зонах имеет пластические деформации.

Устойчивость оболочки рассматривается с позиции Эйлера. При этом определяется верхняя критическая нагрузка. Связи между вариациями параметров деформации и компонентов перемещения предлагаются в виде, справедливом для произвольного исходного моментного состояния оболочки и произвольной формы потери устойчивости.

$$\delta \varepsilon_1 = \frac{1}{A_1} \frac{\partial \delta u}{\partial d_1} + \frac{1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_1}{\partial d_2} \delta v + \frac{1}{\rho_1} \delta w + \vartheta \delta \vartheta ;$$

$$\delta \varepsilon_3 = \frac{1}{A_2} \frac{\partial \delta u}{\partial d_2} - \frac{1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_2}{\partial d_1} \delta v + \frac{1}{A_1} \frac{\partial \delta v}{\partial d_1} - \frac{1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_1}{\partial d_2} \delta w + \\ + \vartheta \delta \psi + \psi \delta \vartheta ;$$

$$\delta k_1 = \frac{1}{A_1} \frac{\partial \delta \vartheta}{\partial d_1} + \frac{1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_1}{\partial d_2} \delta \psi - \frac{1}{\rho_1} \psi \delta \psi ;$$

$$\delta k_3 = \frac{1}{A_2} \frac{\partial \delta \vartheta}{\partial d_2} - \frac{1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_1}{\partial d_2} \delta \vartheta + \frac{1}{A_1} \frac{\partial \delta \psi}{\partial d_1} - \frac{1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_2}{\partial d_1} \delta \psi + \\ + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right) (\vartheta \delta \psi + \psi \delta \vartheta) .$$

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, k_1, k_2$ - деформации и изменения кривизны вдоль координатных направлений d_1 и d_2 ; ε_3, k_3 - сдвиг и кручение для этих направлений;

$$\vartheta = \frac{1}{\rho_1} u - \frac{1}{A_1} \frac{\partial w}{\partial d_1} ; \quad \psi = \frac{1}{\rho_2} v - \frac{1}{A_2} \frac{\partial w}{\partial d_2}$$

u, v, w - составляющие перемещения точки срединной поверхности вдоль линий d_1, d_2 и вдоль нормали соответственно.

Пластичность материала в исходном состоянии учитывается на основе концепции *Shanley*. Обосновывается естествен-

ный характер такого подхода для исходного моментного состояния, существенно неоднородного по толщине оболочки. Связи между силовыми и кинематическими вариациями получены в виде

$$\delta T = A \delta E + H \delta K; \quad \delta M = H \delta E + B \delta K$$

Здесь $T = [T_j]$; $M = [M_j]$; $E = [\varepsilon_j]$; $K = [k_j]$ ($j = 1 \div 3$) - трехкомпонентные векторы; A, H, B - квадратные симметричные матрицы. Отдельные компоненты имеют вид

$$A_{11} = R_1 + R_3 F_1 + S_3 F_2 + I_3 F_3 + R_4 F_4 + S_4 F_5 + I_4 F_6 + R_5 F_7 + \\ + S_5 F_8 + I_5 F_9 + R_6 F_{10} + S_6 F_{11} + I_6 F_{12}; \dots$$

$$[R_j, S_j, I_j, L_j, N_j]^T = \int_h G_j [1, z, z^2, z^3, z^4]^T dz$$

G_j ($j = 1 \div 6$) - модули для физически нелинейного, сжимаемого материала, h - толщина оболочки. $F_1 = 2\varepsilon_1^2 + \varepsilon_1 \varepsilon_2$; $F_2 = 4\varepsilon_1 k_1 - \varepsilon_1 k_2 - \varepsilon_2 k_1$; ... - параметры, учитывающие изгибное деформирование в исходном состоянии. Эффективность алгоритма определяется отсутствием сингулярности в предлагаемой модели.

Силовые связи вариационно соответствуют кинематическим и справедливы для произвольного вида исходного моментного состояния произвольной тонкостенной оболочки.

$$\frac{\partial (A_2 \delta T_1)}{\partial d_1} - \frac{\partial A_2 \delta T_2}{\partial d_1} + \frac{\partial (A_1 \delta T_3)}{\partial d_2} + \frac{\partial A_1 \delta T_3}{\partial d_2} + \frac{A_1 A_2}{f_1} \delta N_1 = 0$$

$$\frac{\partial (A_2 \delta N_1)}{\partial d_1} + \frac{\partial (A_1 \delta N_2)}{\partial d_2} - A_1 A_2 \left(\frac{1}{f_1} \delta T_1 + \frac{1}{f_2} \delta T_2 \right) = 0$$

$$A_1 A_2 \delta N_1 = \frac{\partial (A_2 \delta M_1)}{\partial d_1} - \frac{\partial A_2 \delta M_2}{\partial d_1} + \frac{\partial (A_1 \delta M_3)}{\partial d_2} + \frac{\partial A_1 \delta M_3}{\partial d_2} - \\ - A_1 A_2 \left\{ \left(T_1 - \frac{M_2}{f_1} \right) \delta \varepsilon + \left(\delta T_1 - \frac{\delta M_2}{f_2} \right) \varepsilon + \left[T_3 + \left(\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \right) \frac{M_3}{2} \right] \delta \psi + \right. \\ \left. + \left[\delta T_3 + \left(\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \right) \frac{\delta M_3}{2} \right] \psi \right\};$$

Бифуркация отвечает обращению в ноль соответствующего дискриминанта. Решение ориентировано на дискретизацию оболочки по толщине и по поверхности. Естественно использование метода конечных элементов, метода сеток.

ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ СРЕДЫ С ДВУМЯ СТРУКТУРНЫМИ УРОВНЯМИ

Волков А.Е.

Концепция структурных уровней, отражающих структурную иерархию поликристаллических материалов, развиваемая с различных точек зрения [1-3], восходит еще к работам братьев Коссера, по мнению которых предлагаемая ими среда должна отражать кристаллическое строение твердых тел. Предполагается, что точками макроконтинуума служат структурные элементы, наделяемые некоторыми степенями свободы - внутренними степенями свободы точек макросреды. В теории Коссера структурные элементы могут только поворачиваться, в среде Миндлина [2] - испытывать однородную деформацию, в работе В.Е.Панина с сотрудниками [3] структурные элементы могут испытывать произвольную неоднородную деформацию, сами содержат дефекты, способные двигаться и т.д.

В настоящем докладе предлагается несколько отличный от [3] путь построения двухуровневой среды на базе среды Миндлина. Предполагается, что деформация внутри структурных элементов (на микроуровне) может быть как упругая, так и пластическая, причем пластическая деформация реализуется путем движения дислокаций. На втором уровне (макроуровне) параметрами состояния приняты относительная дисторсия γ_{ij} (разность между макро- и микродисторсиями) и обобщенный изгиб-кручение $\mathcal{X}_{kij} = \nabla_k \Psi_{ij}$ (макроградиент микродисторсии Ψ_{ij}). Соответственно этому, следуя идеям работ де Вита [4], на втором уровне вводятся дефекты, обладающие дислокационной α_{ij} и обобщенной дисклинационной θ_{kij} плотностями

$$\alpha_{ij} = -e_{klm} \nabla_l \gamma_{mj}^P - e_{klm} \mathcal{X}_{lmj}^P, \quad (1)$$

$$\theta_{kij} = -e_{klm} \nabla_l \mathcal{X}_{mij}^P, \quad (2)$$

где e_{klm} - тензор Леви-Чивиты, в верхний индекс P обозначает пластический характер соответствующей величины. Кроме этих двух типов дефектов, вводятся еще особые дефекты, описывающие условия сопряжения между уровнями

$$\lambda_{kij} = \partial e_{kij}^P - \nabla_k \psi_{ij}^P, \quad (3)$$

Рассматривается влияние движения дефектов на разных уровнях на пластическую деформацию. Так движение микродислокаций генерирует пластическую микродеформацию, макродислокаций и макродисклинаций - пластические величины γ_{ij}^P и ∂e_{kij}^P :

$$\dot{\gamma}_{ij}^P = -e_{pqm} v_q \alpha_{mj}, \quad (4)$$

$$\dot{\partial e}_{kij}^P = -e_{pqm} v_q \theta_{mkj}. \quad (5)$$

Здесь v_q - скорость движения дефектов.

Выявлена связь между дефектами первого и второго уровней, носящая кинематический характер: рассчитано изменение плотностей дефектов α_{mj} и λ_{kij} , когда микродислокации движутся внутри структурных элементов, изменяя форму последних.

Литература

1. Кадашевич Ю.И., Новожилов З.В. Об учете микронапряжений в теории пластичности. - Изв. АН СССР Механика твердого тела, 1968, № 3, с. 82 - 91.
2. Миндлин Р.Д. Микроструктура в линейной упругости. - Сб. переводов. Механика, 1964, № 4, с. 129 - 160.
3. Панин В.Е., Гриняев Ю.В., Елсукова Т.Ф., Иванчин А.Г. Структурные уровни деформации твердых тел. - Изв. вузов Физика, 1982, т. 25, № 6, с. 5 - 27.
4. Де Вит Р. Континуальная теория дисклинаций. М., Мир, 1977, 208 с.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ВОЗМУЩЕНИЙ В ЗАДАЧЕ О ЧИСТОМ ИЗГИБЕ ЛИСТА С УЧЕТОМ УПРОЧНЕНИЯ

Бульман С.А., Семькина Т.Д.

Исследуется чистый изгиб листа из несжимаемого материала, подчиняющегося закону степенного упрочнения

$$\sigma_i = A \varepsilon_i^x \quad (0 < x < 1).$$

При этом предполагается, что реализуется плоское деформированное состояние.

Задачу можно рассматривать в качестве расчетной схемы технологических операций, при которых получают детали конечной кривизны.

Применение метода возмущений позволяет применять теорию малых упруго-пластических деформаций, рассматривая весь процесс деформирования как последовательность малых приращений кривизны листа.

В начале нагружения лист имеет форму полосы, и на первом этапе деформирования решение проводится в декартовой системе координат. Определяется допустимое значение кривизны, до которого полученное решение допустимо.

Всё последующее решение проводится в цилиндрической системе координат. Полная деформация волокна определяется как сумма накопленной деформации на предыдущих этапах деформирования и приращении деформации на рассматриваемом этапе. Учитывается положение волокна на каждом этапе деформирования и изменение толщины листа. Кривизна слоя, являющегося нейтральным на этом этапе, и его положение по толщине листа определяются из условия равенства нулю полной окружной деформации на данном этапе. Граничные условия записываются на внутренней и внешней поверхностях листа, кривизны которых определяются из решения задачи на предыдущем этапе деформирования.

Предполагается, что окружная деформация на внутренней поверхности листа получает приращение, величина которого задана и мала по сравнению с деформацией, накопленной в процессе предыдущего нагружения. Это предположение позволяет провести линеаризацию нелинейных соотношений, из которых определяется решение.

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПРИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Горбачевич М.И., Александрова М.П., Снитко А.Н.

Задача оптимального проектирования многослойной оболочки ставится следующим образом: найти оптимальную структуру конструкции (число слоёв, толщину и материал каждого слоя из заданного перечня, величины зазоров между слоями) при действии осесимметричных, изменяющихся во времени тепловых и механических нагрузок с учётом нелинейности диаграмм деформирования материалов и переменности их характеристик в зависимости от температуры. Рассматриваются одно- временно слои с двумя признаками: слои из одного материала и слои независимо деформирующиеся в осевом направлении. При решении последовательно исследуются две задачи:

1) отыскивается оптимальная структура конструкции при приближённом определении толщин слоёв без учёта зазоров между слоями,

2) определяются оптимальные толщины слоёв и величины зазоров с использованием результатов решения первой задачи в качестве начального приближения.

Их задача (задача дискретного программирования) сводится к определению оптимальных значений дискретных переменных X_i при выполнении условий:

$$X_i = \pm(1, \dots, m+1); F(\bar{X}) \rightarrow \min, \eta_j \geq 1,$$

$$i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, n\ell_0; \bar{X} = [X_1, \dots, X_n],$$

где m — число рассматриваемых материалов, $F(\bar{X})$ — масса рассматриваемого участка оболочки, η_j — коэффициент запаса прочности, определяемый по обобщённому критерию прочности Писаренко-Лебедева в каждом из n конечных элементов (по толщине оболочки) в каждый из ℓ_0 расчётных моментов времени.

Знак X_i (идентификатора материала) отвечает наличию

или отсутствию связи по наружной поверхности каждого слоя с соседним при осевой деформации.

Математическая постановка второй задачи (задачи нелинейного программирования) имеет вид:

$$F(\bar{h}) \rightarrow \min, \eta_j \geq 1, \bar{h} = (h_1, \dots, h_{m_0}); j = 1, \dots, n_{\ell_0},$$

где h — толщина слоя или величина зазора,

m_0 — суммарное число слоёв и зазоров в оболочке.

Решение обеих задач осуществляется по специально разработанным алгоритмам дискретного и нелинейного математического программирования. При вычислении ограничений методом конечных элементов решаются задачи нестационарной теплопроводности и термопластичности. Учёт нелинейности деформирования осуществляется методом переменных параметров упругости с использованием итерационной процедуры, предусматривающей уточнение значений секущего модуля упругости и коэффициента Пуассона. Осевые относительные деформации рассматриваются как начальные и рассчитываются на каждом шаге итерации по значениям ε_{ℓ} и ε_0 , полученным на предыдущем шаге (при использовании условия плоского деформирования). Благодаря этому приёму разрешающая система уравнений имеет трёхдиагональную структуру, что существенно сокращает время счёта.

Наличие зазоров учитывается заданием на их месте дополнительных слоёв материала, имеющего следующие значения коэффициента Пуассона и секущего модуля: $\nu = 0$, $E = E_2$, где E_2 — определённая на предыдущем шаге итерации величина радиального напряжения в конечном элементе, соответствующем рассматриваемому зазору.

Результаты тестовых расчётов выявили обоснованность постановки задачи и эффективность методов её решения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Писаренко Г.С., Лебедев А.А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряжённом состоянии. — Киев, "Наукова думка", 1976.
2. Чирас А.А. Математические модели анализа и оптимизации упругопластических систем. — Вильнюс, "Мокслас", 1982.

ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОБОЛОЧЕК СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИИ В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ СТАДИИ

Горев Ю.Г.

Для расчета оболочек с учетом подкреплений в пространственной постановке используется метод конечных элементов. Железобетон рассматривается как слоистый, локально ортотропный, неоднородный материал. Энергия деформации армированных слоев подсчитывается с помощью переменных эффективных модулей упругости и коэффициентов бокового давления. Такой подход позволяет учитывать дискретность расположения стержней арматуры, дисперсное армирование и армирование фибрами.

Динамические зависимости напряжения-деформации для стали и бетона строятся с использованием статических умножением необходимых ординат на коэффициент упрочнения. Значения коэффициентов упрочнения определяются в зависимости от текущих значений величин деформаций и их скоростей в расчетные моменты времени.

Диаграммы $\sigma - \varepsilon$ для стали и бетона аппроксимируются полиномами вида $\sigma = \alpha_1 + \alpha_2 \varepsilon + \alpha_3 \varepsilon^2 + \dots + \alpha_n \varepsilon^n$ /1/. Количество учитываемых членов зависит от характера диаграммы. Такое описание диаграмм $\sigma - \varepsilon$ позволяет путем задания коэффициентов α_i описывать упругопластические свойства различных видов бетонов и классов арматуры. Значения коэффициентов α_i определены в программе и могут быть изменены с помощью исходных данных.

Для стали и бетона учитываются остаточные деформации, трещины и дробления в бетоне. Это позволяет прогнозировать разрушения и поведение конструкций при повторном сейсмическом воздействии при землетрясениях.

Уравнения равновесия узлов конечных элементов в матричной форме записываются $[M]\{\ddot{q}\} + [K](\lambda\{\dot{q}\} + \{\dot{q}\}) = \{F\}$ /2/, где $[M]$ - матрица инерции, $\{\dot{q}\}, \{\ddot{q}\}, \{\dot{q}\}, \{F\}$ - векторы перемещений, скоростей, ускорений узлов конечных элементов и вектор нагрузок.

При использовании элементов с высоким порядком аппроксимации недопустимо использование несогласованной матрицы инерции. Согласованная матрица имеет большую ширину ленты

коэффициентов, особенно при наличии подкреплений.

Для динамических задач с учетом пластических свойств железобетона для случаев, когда используется согласованная матрица инерции, предлагается применять метод суперэлементов. Его применение возможно на этапе численного решения системы алгебраических дифференциальных уравнений /2/. Численное решение /2/, например, методом Рунге-Кутты, предполагает неоднократное определение векторов $\{X\}$ из системы алгебраических уравнений вида $[M]\{X\} = \{A\}$ /3/. Используя формальное сходство /3/ с уравнениями статики, применяем для решения этой системы метод суперэлементов, необходимый для уменьшения числа уравнений, и метод Гаусса. Обработку матрицы $[M]$ прямым ходом по Гауссу осуществляем только один раз на все время решения задачи. При этом дополнительно создается матрица $[M_i]$, составленная из первых строк сокращенных матриц матрицы $[M]$. Следовательно, размеры и структура $[M_i]$ такие же, как $[M]$. $[M_i]$ и обработанная $[M]$ хранятся до конца счета. С помощью $[M_i]$ осуществляется прямой ход для векторов $\{A\}$, а с помощью обработанной $[M]$ - обратный ход. Таким образом, применение суперэлементов для аппроксимации инерции улучшает обусловленность системы и совместно с изложенной методикой решения уравнений сокращает затраты машинного времени.

В качестве базовых суперэлементов выбираются конструктивные элементы, геометрию которых можно описать одним конечным элементом второго или третьего порядка аппроксимации. Нормализованная система координат такого элемента и аппроксимирующие полиномы используются для построения сетки базовых конечных элементов суперэлемента со своей нумерацией узлов. Эти операции автоматизированы. Исходными данными служат число конечных элементов в плоскости конечного элемента аппроксимирующего геометрию суперэлемента, число элементов по толщине, размер ячеек по указанным направлениям и размеры конструкции в плане и по толщине. Размеры могут быть абсолютными или в относительных единицах.

О ВЛИЯНИИ ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ТЕКУЧЕСТЬ АНИЗОТРОПНОГО ТЕЛА

Греков М. А.

При построении теоретической границы текучести анизотропных листовых металлов в литературе обычно принимается гипотеза о пластической несжимаемости материала, т.е. предполагается, как и в изотропном случае, что гидростатические напряжения не влияют на предел текучести материала. Вместе с тем некоторые экспериментальные данные указывают на то, что пренебрежение влиянием гидростатического давления приводит к значительному расхождению теоретической границы текучести и эксперимента.

На примере ортотропного тела в работе показывается, что гипотеза о пластической несжимаемости в общем случае противоречит ассоциированному закону течения. Этот факт является следствием упругой анизотропии материала. Для устранения указанного противоречия сформулирован критерий текучести, в котором зависимость функции текучести от гидростатического давления определяется главными значениями тензора объемного расширения и эффектом SD . В частном случае упругой анизотропии, когда тензор объемного расширения – шаровой, и при отсутствии эффекта SD предлагаемый критерий совпадает с критерием Хилла.

Сопоставление критерия с экспериментальными данными подтверждает необходимость учета упругой анизотропии материала в критерии текучести и, как следствие этого, учета влияния гидростатических напряжений на текучесть анизотропного тела.

ДЕФОРМАЦИЯ И РАЗРУШЕНИЕ КРИСТАЛЛОВ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ НАГРУЖЕНИИ ИНДЕНТОРОМ

Гриднева И.В., Мильман Д.В., Чугунова С.И.

Показана возможность применимости метода локального нагружения кристаллов индентором для исследования механических свойств и подвижности дислокаций в кристаллах с ковалентным характером межатомной связи.

1. При исследовании сопротивления ковалентных кристаллов микровдавливанию развита методика разделения упругой и пластической деформации в экспериментах по микровдавливанию с непрерывной записью диаграмм нагружения. Соотношение между упругой и пластической деформацией под индентором различно для различных материалов и определяется отношением H_V/E . Метод позволяет рассчитать модуль упругости материала, а также определяет сопротивление материала пластическому деформированию. Показано, что при малой глубине внедрения индентор уменьшается вклад пластической деформации по сравнению с упругой, что приводит к резкому росту твердости.

2. В предположении, что дислокации движутся от внедрившегося индентора в виде ряда и что скорость дислокаций $v \sim \tau \exp(-u/kT)$, где τ - эффективное напряжение, u - энергия активации движения дислокаций, получено приближенное решение для зависимости длины дислокационных трасс l вокруг отпечатка микротвердости, нанесенного на монокристалл, от нагрузки на индентор P , температуры T и времени нагружения t в виде $l \sim P^{m/2m+1} t^{1/2m+1} \exp(-u/kT(2m+1))$

В определенном интервале изменения параметров уравнение удовлетворительно соответствует полученным и литературным экспериментальным данным и может быть использовано для оценки подвижности дислокаций по длине дислокационных трасс. Значение l связано с пределом текучести τ_s . Так, $l\tau_s \approx \text{const}$ для ковалентных кристаллов ($m \approx 1$) и $l^2\tau_s \approx \text{const}$ для ионных кристаллов ($m \approx 2$).

3. Для хрупких монокристаллов развита методика определения температуры хладноломкости T_x в опытах по измерению горячей твердости. Показано, что для монокристаллов температура исчезновения трещины вокруг отпечатка твердости соответствует T_x , определенной при испытании на изгиб.

О ВЛИЯНИИ УПРОЧНЕНИЯ МАТЕРИАЛА И НАРУШЕНИЯ ФОРМЫ ПРИ
ПОПЕРЕЧНОМ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ НА ПОВЕДЕНИЕ
ПЛАСТИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

Гудрамович В.С., Деменков А.Ф.

В процессе нагружения в реальных условиях эксплуатации, а также при технологических режимах изготовления тонкостенные конструкции приобретают различные начальные несовершенства: несовершенства формы, остаточные напряжения, деформации, неоднородность механических свойств материала и т.д., которые, как правило, имеют нерегулярный характер. Зачастую причиной появления таких несовершенств является динамическое поперечное нагружение. Нагружения, вызывающие несовершенства, могут быть как предусмотренными для данной конструкции, так и случайными, непредвиденными (знакопеременные нагружения при транспортировке, ударные нагружения, «всплеск» давления, температур и т.д.). Появившиеся несовершенства приводят к существенной неоднородности напряженно-деформированного состояния и могут значительно повлиять на поведение конструкции при её дальнейшей эксплуатации. Вследствие нерегулярности и неоднородности воздействий расчет таких систем чрезвычайно усложняется.

Рассмотрен процесс пластического деформирования и несущая способность элементов конструкций в виде цилиндрических оболочек, имеющих начальное несовершенство формы и связанное с ним неоднородное упрочнение материала, полученные в результате предварительного динамического поперечного воздействия. Методика расчета основана на интегрировании с использованием метода Бубнова-Галерки на линеаризованной методами последовательных нагружений и переменных параметров упругости (на каждом этапе на-

гружения) системы дифференциальных уравнений равновесия и совместности деформаций / 1, 2/. Использовались соотношения деформационной теории пластичности в приращениях /3/. Предельные нагрузки, соответствующие несущей способности, определяются на основе построения зависимостей "нагрузка-прогиб".

Проведенные исследования показали, что учет влияния только несовершенств формы может привести к качественно и количественно отличным результатам по сравнению с расчетами, проведенными с учетом совместного влияния несовершенств формы и неоднородного упрочнения материала, который дает близкую к реальной картину поведения конструкции. Для исследованных случаев учет влияния неоднородного упрочнения приводит к менее интенсивному росту прогибов при нагружении и к более высоким уровням нагрузок, характеризующих несущую способность оболочек (различие составляет 25 %). Результаты расчета подтверждаются данными экспериментальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гудрамович В.С., Деменков А.Ф. Об изгибе и несущей способности неупругих цилиндрических оболочек с начальными несовершенствами формы и остаточными напряжениями. - Докл. АН УССР. Сер.А, 1977, с. 25 - 33.
2. Гудрамович В.С., Деменков А.Ф. Упруго-пластические оболочки с нерегулярными полями несовершенств формы и остаточных напряжений. - В кн.: Тез. докл. УП Всес. конф. по прочности и пластичности. Пермь, 1983. с. 50 - 51.
3. Угодчиков А.Т., Коротких Ю.Г. Некоторые методы решения на ЭЦМ физически нелинейных задач теории пластин и оболочек. - К.: Наук. думка.-1971, 220 с.

ОСОБЕННОСТИ СУБМИКРОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ

Гукасов Л.Г., Челноков В.А., Титовед Д.Ф., Кузьмин Н.Л.

Настоящая работа ставит своей целью исследование методом рентгеноструктурного анализа особенностей ранних стадий циклической микропластической деформации, соответствующей началу амплитудной зависимости внутреннего трения.

Образцы изготовлялись из сплава $Al + 0,2\% Si$. Нагружение осуществлялось изгибом на частоте 500 Гц. Амплитуда пластической деформации составляла 10^{-8} – 10^{-6} . Размер зерна исследуемых образцов 2–5 мкм. Рентгеновские измерения выполнялись на дифрактометре ДРОН-1. Съёмка велась по схеме ω -сканирования. Особенности профилей анализировали для границ, стиков и внутренних областей 20 зерен, расположенных на поверхности поликристалла. В результате было установлено, что как в различных точках одного зерна, так и в разных зернах изменения профиля различны, что свидетельствует о крайней неоднородности микрепластической деформации.

При самых малых амплитудах деформации изменения профиля линии наблюдали в тройных стыках некоторых зерен. При увеличении амплитуды деформации искажение профиля обнаружили в приграничных областях некоторых зерен. Наблюдается расщепление профиля, изменение его полуширины и положения максимума. Все это может быть истолковано как возникновение новых разориентированных областей и субзерен. Число подобных субзерен, их размеры (~ 100 мкм) и углы разориентировки изменялись от точки к точке. Дальнейшее возрастание амплитуды колебаний способствует распространению блочной субструктуры в глубь зерна.

В результате можно утверждать следующее

При амплитудах колебаний, соответствующих началу амплитудной зависимости внутреннего трения вблизи тройных стыков зерен, наблюдается размножение дислокаций. В этих местах локальная плотность дислокаций увеличивается настолько, что начинают проявляться коллективные эффекты, приводящие к образованию субзерен.

ОБЩИЕ ТЕОРЕМЫ ДИНАМИКИ ЖЕСТКОПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЛА ПРИ КОНЕЧНЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ КОНФИГУРАЦИИ

Данилов А.И., Ерхов М.И.

Даются минимальный и максимальный принципы динамики жесткопластического тела или системы с учетом конечных изменений конфигурации. Экстремальные принципы выражают общие свойства решений задач динамики пластических тел и используют их экстремальные свойства. Принципы имеют более простую математическую формулировку, чем соответствующие модификации принципа Гаусса. Другим преимуществом предлагаемых принципов является то, что значения минимизируемых (или максимизируемых) функционалов на точном решении известны, что дает критерий истинности решения. В результате может быть определено истинное решение или дана двухсторонняя интегральная оценка приближенного решения задач динамики.

С помощью интегрирования по времени получены выражения экстремальных принципов, которые не содержат ни ускорений, ни производных по времени от скоростей. В случае дискретной системы интегрирования по области следует заменить суммированием по объектам.

Показывается единственность решения задач динамики жесткопластического тела, не опирающаяся на предположение о невозможности конфигурационного ветвления; единственность конфигурации получается вследствие единственности поля скоростей.

Экстремальные принципы позволяют сформулировать задачу динамики как задачу на условный экстремум функционала. Алгоритм решения задач сводится к последовательному решению задач квадратичного программирования. Даны примеры решения задач о динамическом деформировании стержневых систем с учетом конечных перемещений при воздействии кратковременных нагрузок большой интенсивности. При численном решении используется дискретизация по координатам пространства и времени. Иллюстрируется эффективность разработанной методики решения задач динамики жесткопластических тел и систем.

МИКРОПЛАСТИЧНОСТЬ КАРБИДОВ И НИТРИДОВ МЕТАЛЛОВ IУА ПОДГРУППЫ

Демяшев Г.М., Хусаинов М.А.

Известно, что хрупкие материалы (тугоплавкие карбиды и нитриды, полученные газофазным методом из смесей $MeCe_y + CH_4 + H_2$ и $MeCe_y + N_2 + H_2$, где $Me = Zr, Ti, Hf$) характеризуются довольно узким интервалом перехода ($T_x'' - T_x^0$) из вязкого состояния в хрупкое, а при T_x'' разрушающее напряжение достигает максимального значения. Считается установленным, что карбиды и нитриды металлов IУА подгруппы при температуре $\leq T_x''$ (нижний интервал температуры перехода) проявляют лишь упругое поведение перед разрушением.

Испытания на изгиб методом статического изгиба кольцевых образцов С-образной формы в диапазоне 20–2300°C и последующие электронно-микроскопические исследования поверхностей излома показали, что постепенный рост уровня разрушающего напряжения до температуры T_x'' обусловлен явлением микропластичности. Структурные исследования позволили описать основные аспекты микропластического поведения тугоплавких соединений, выявить общность процессов, протекающих в них с учетом наличия структурных дефектов (пор, включений), и рекомендовать на этой основе оптимальный состав материала.

Обнаружена повышенная чувствительность к концентраторам напряжений. Это свидетельствует о том, что микропластичность в своей основе имеет локальный эффект. Возникновение локальных микродеформаций (пластических сдвигов) приводит к повышению сопротивления деформированию.

Таким образом, по результатам исследований сделано следующее заключение. Во-первых, микропластичность есть обязательное условие существенного роста уровня разрушающего напряжения. Во-вторых, наличие включений и вторых фаз способствует развитию пластических сдвигов в микрообъемах. В-третьих, формирование некристаллических тонкодисперсных частиц, например, углеродных в объеме хрупкой матрицы карбидов приводит к появлению низкотемпературного ($\sim 0,3 T_{пл}$) пика прочности.

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ЦИКЛИЧЕСКИ СИММЕТРИЧНЫХ ОБОЛОЧЕК

Дехтярь А.С.

Рассматриваются круглые в плане оболочки из идеального жесткопластического материала. Их циклическая симметрия может быть связана с формой срединной поверхности, с распределением материала, с конфигурацией нагрузки и с опиранием на дискретные опоры.

В прежних исследованиях автора рассматривались оболочки с циклически симметричной формой поверхности и оболочки, подкрепленные ребрами. Здесь рассматривается задача о верхней границе предельной равномерной нагрузки на оболочку при опирании подкрепленного или неподкрепленного края на регулярно расположенные точечные опоры.

Приведен анализ известных в литературе аналогичных исследований круглых пластинок.

Основная часть доклада посвящена разысканию полей скоростей перемещений, кинематически допустимых при точечном опирании. Наряду с традиционным кинематическим анализом теории предельного равновесия в сочетании с линейной моментной теорией оболочек применен также метод линий текучести и рассмотрены различные локальные формы разрушения.

Верхние оценки предельной интенсивности нагрузки, получаемые при разных видах циклического разрушения, сопоставлены с решениями аналогичных осесимметричных задач при свободном и шарнирно-неподвижном закреплении краев оболочки. Установлено такое количество точечных опор, начиная с которого циклически симметричная форма разрушения переходит в осесимметричную.

Пакет программ для решения циклически симметричных задач предельного анализа жесткопластических оболочек допускает одновременно периодическое строение срединной поверхности, подкрепление оболочки меридиональными ребрами, регулярные отверстия и точечное опирание. Пакет ориентирован на использование в составе оптимизационных задач.

МЕХАНИКА УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЗЕРНИСТОЙ СРЕДЫ

Дидух Б.И.

Зернистые среды – песок, щебень, зерна пшеницы, каменная наброска и т.п. материалы – обнаруживают в механических испытаниях свойства, характерные для упруго-пластических тел: остаточные деформации, различие поведения при нагружении и разгрузке, достижение предельного состояния с последующим течением.

Используемое в настоящее время описание механических свойств таких сред базируется на представлениях теории пластического упрочнения, а основная информация об уравнениях состояния поступает из результатов опытов с макрообразцами в феноменологической постановке. При этом, однако, физический механизм преобразования микроструктуры исследуемой зернистой среды обычно остается вне поля исследователя. Кроме того, несмотря на постоянное усложнение формулировок уравнений состояния, они не могут прогнозировать деформирование материала при сложных историях нагружения. Решение отмеченных проблем возможно на базе модели дискретной зернистой среды.

Разработана модель зернистой среды как ансамбля плоских упругих дисков с контактным трением. Контактующие между собой диски могут иметь произвольную конфигурацию. Изучению подлежат различные структуры дисков, задаваемые некоторым начальным расположением на части плоскости, которое определяет места контактов соседних дисков, а также тип и геометрию границ структуры. Механическое взаимодействие контактирующих дисков состоит в передаче сил (нормальной и касательной) и момента. Произвольная структура зерен, находящаяся в равновесии, оказывается в общем случае статически неопределимой системой. При изменении внешних усилий или вследствие принудительного деформирования структуры в отдельных контактах достигаются предельные условия по трению скольжения или качения, и становится возможным

относительное проскальзывание или перекачивание зёрен. Степень статической неопределимости системы снижается, и возрастает деформативность структуры. Особенно резко увеличивается податливость структуры при выключении из работы отдельных контактов.

Разработано математическое описание постадийного изменения напряженно-деформированного состояния ансамбля зёрен, вплоть до полного исчерпания прочности, а также описание последующего движения. Выполнены численные эксперименты на ЭВМ для нескольких характерных структур, в том числе имитирующие испытания представительного объема зернистой среды на сдвиговых и трехосных приборах. Реализованы сложные траектории нагружения структур, включающие разгрузку. При исследовании конкретных структур установлены предельные по прочности нагрузки. В зависимости от конфигурации структуры и характера ограничивающих ее внешних связей структура может превратиться в механизм и перейти в движение.

Движение набора зёрен в условиях кинематических ограничений, создаваемых наличием остального объема зернистой среды, окружающего данный набор, приводит к переукладке зёрен в новое расположение. В этом новом расположении структура зёрен может оказаться способной выдержать большую нагрузку, чем та, которая обусловила движение структуры в предшествующем расположении.

В итоге описан и раскрыт физический механизм пластического деформирования объема зернистой среды как последовательность локальных нарушений прочности отдельных составляющих его структур и переукладки зёрен в этих структурах. Интегральное поведение ансамбля обнаруживает присущий реальным зернистым средам упруго-пластический характер, несмотря на то, что каждое отдельное зерно наделено лишь свойством упругости.

Примером использования модели для изучения напряженно-деформированного состояния массивов служит докладываемая задача о деформациях и устойчивости структуры зернистого материала на склоне.

ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ПРИ МАРТЕНСИТНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ ИЗОТРОПНЫХ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ

Ермолаев В.А.

Полученное ранее общее выражение для макроскопической дисторсии превращения тела с произвольной начальной текстурой существенно упрощается в случае исходной изотропии. Результаты, во-первых, могут быть применимы к реальным поликристаллам, которые часто можно рассматривать как макроскопически изотропные, а, во-вторых, представляют интерес с точки зрения сопоставления с другими моделями, наиболее разработанными в большинстве случаев именно для изотропных тел. Для случая малых напряжений и полного превращения, т.е., когда весь поликристалл находится в мартенситном состоянии (при прямом превращении), а напряжения так малы, что в каждом зерне реализуются все варианты превращения, но в разной степени, деформация превращения $\mathcal{E}(\sigma)$ равна

$$\mathcal{E}(\sigma) = \frac{1}{3} \mathbb{I} \mathbb{I}_1(E) + A [\mathbb{I}_2(E) - \mathbb{I}_2(E_0)] \text{Dev } \sigma,$$

или

$$\text{Dev } \mathcal{E}(\sigma) = A [\mathbb{I}_2(E) - \mathbb{I}_2(E_0)] \text{Dev } \sigma,$$

где σ - тензор напряжений, E - локальная деформация одного из вариантов превращения, E_0 - средняя по всем вариантам деформации превращения, \mathbb{I}_1 и \mathbb{I}_2 - соответственно первый и второй инварианты, \mathbb{I} - единичный тензор. Коэффициент A выражается известным образом через термодинамические характеристики превращения. При указанном условии малости напряжений деформации полного превращения могут достигать 5-8% и являются достаточными для практического использования. Таким образом, девиаторы деформаций и напряжений при указанных условиях пропорциональны. Полученные выражения можно использовать для сравнения величин накопленных деформаций в случаях различных напряженных состояний. Так, например, при одном и том же напряженном состоянии деформация кручения оказывается в 3 раза больше деформации растяжения.

Кроме того можно произвести сопоставление способности поликристаллов к накоплению деформации при прямом и обратном мартенситных превращениях. При этом учтем, что если прямое превращение описывается локальной деформацией E , то среди различных вариантов обратного превращения существует такой, при котором все точки среды смещаются точно назад в исходное положение и, следовательно, такой вариант соответствует локальной деформации $E' = -E$ (в предположении малости локальных деформаций). Тогда, с точностью до величины второго порядка по компонентам тензора E

$$I_2(E') = I_2(E).$$

Заметим далее, что почти все металлы и сплавы при прямом превращении переходят из кубической структуры в структуру какой-либо другой сингонии. Таким образом, достаточно сравнить $I_2(E_0)$ для кубической сингонии и локальной деформации

E , соответствующей прямому превращению, с $I_2(E'_0)$ для всех других сингоний и локальной деформации $E' = -E$.

Анализ показал, что для прямого превращения из структуры кубической сингонии $I_2(E_0) = \frac{1}{3} I_1^2(E)$, в то время как для обратных превращений $I_2(E'_0) \geq \frac{1}{3} I_1^2(E)$. Таким образом, деформация обратного превращения не превышает деформации прямого превращения (при одинаковых напряжениях). Кроме того, если прямое превращение имеет, как правило, несколько вариантов, то обратное часто может происходить лишь единственным образом. В таких случаях $E'_0 = E'$ и деформация полного обратного превращения равна нулю (для изотропного тела). Это, однако, не исключает деформирования в процессе обратного превращения, но такое деформирование носит сложный характер: сначала происходит формоизменение в сторону приложенных сил, а затем в обратном направлении.

Сделанные выводы и оценки находятся в хорошем соответствии с экспериментальными результатами.

ПЛАСТИЧНОСТЬ КРИСТАЛЛОВ С ПОЛИГОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ

Засимчук Е.Э., Селицер С.И.

Подробно исследовано случайное поле внутренних напряжений, создаваемое полигональной структурой, состоящей из квазиэквидистантных стенок краевых дислокаций и имеющей случайный размер полигона. Показано, что «амплитуда» поля уменьшается, а длина волны увеличивается с увеличением расстояния от границы полигона. Проведено сопоставление «амплитуды» поля полигональной структуры и хаотических дислокаций внутри полигонов. С помощью численных расчетов на ЭВМ изучено пространственное распределение дальнедействующих компонент суммарного поля, создаваемого полигональной структурой и хаотическими дислокациями внутри полигонов. Результаты аналитических и машинных расчетов положены в основу разрабатываемой теории пластической деформации кристаллов, содержащих различные ансамбли дефектов. Применительно к кристаллам с полигональной структурой решается два типа задач:

1. Пластическая деформация, осуществляемая дефектами внутри полигонов, — исходная полигональная структура сохраняется.

2. Пластическая деформация, происходящая в условиях структурной неустойчивости, — исходная полигональная структура разрушается.

Численными расчетами на ЭВМ получено выражение для средней длины свободного пробега дислокаций внутри полигонов, позволяющее оценить характер микропластичности кристаллов с полигональной структурой. Определены условия размножения дислокаций внутри полигональной структуры. Определены характерные параметры устойчивости полигональной структуры при нагружении в новых условиях. Показано, что полигональная структура может быть разрушена вновь формирующейся структурой с существенно меньшей плотностью дислокаций.

УЧЕТ МИКРОРАЗРУШЕНИЯ В ТЕОРИИ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ

Кадашевич Ю.И., Михайлов А.Н.

В последние несколько десятилетий активно развиваются теории пластичности и ползучести с целью более детального описания поведения материалов при сложном нагружении.

Обсуждаются возможности обобщенной теории пластического течения при условии введения в теорию тензора микроразрушения. Теория базируется на следующих положениях:

1. В пространстве деформаций существует поверхность, при достижении границы которой начинается процесс локального разрушения. При активном нагружении эта поверхность перемещается в пространстве деформаций, изменяя размеры и форму, что приводит к возникновению и развитию напряжений σ_{ij}^f .

2. Напряжения σ_{ij}^f подчиняются законам, аналогичным локальным законам в теории пластического течения.

Простейший такой закон имеет вид

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \rho \frac{d\sigma_{ij}^f}{d\mu} + \kappa \sigma_{ij}^f ;$$

$$\dot{\sigma}_{ij} + \sigma_{ij}^f = 2G \dot{\epsilon}_{ij} ;$$

$$d\mu = \sqrt{\frac{1}{2} d\sigma_{ij}^f d\sigma_{ij}^f} .$$

Здесь приняты стандартные обозначения, рассматриваются соотношения между девиаторами, материал принимается изотропным и поверхность разрушения имеет форму Мизеса.

3. Предполагается, что ρ (локальный предел разрушения) есть величина случайная, закон распределения которой известен. В этом случае можно построить различные статистические модели среды, обладающие весьма интересными свойствами.

В докладе рассмотрено совместное действие механизма микроразрушения и пластического деформирования, указаны пути распределения всех сформулированных положений на ползучесть. В заключении устанавливается взаимосвязь теории с известными моделями разрушения А.Ю.Ишлинского.

ТЕОРИЯ ПОЛОГИХ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК, СОСТАВЛЕННЫХ ИЗ НЕСПАЯННЫХ СЛОЕВ

Калекин О.Д., Кантор Б.Я.

Построено смешанное вариационное уравнение равновесия пологих оболочек, слои которых взаимодействуют односторонне за пределом упругости.

Напряженно-деформированное состояние слоев описано квадратично геометрически нелинейной теорией оболочек Кирхгофа-Лява в сочетании с теорией малых упруго-пластических деформаций. Контактное давление между соседними слоями принято пропорциональным разности их нормальных перемещений — обжатия по толщине.

Совокупность вектор-функций N слоев $U_k = \{\omega_k, \varphi_k\}$, $k \in [1, N]$ представлена одной функцией трех переменных, разложенной в ряд по ортонормированным полиномам дискретного аргумента — аппликаты Z_k срединной поверхности слоя.

Предположение о том, что прогибы и функции усилий слоев изменяются при переходе от слоя к слою медленно, позволяет уменьшить число новых искомых вектор-функций, которые представляют собой коэффициенты ряда.

Указан процесс итераций, совмещающий уточнение границ зон контакта между слоями с шагами методов Ньютона-Канторовича и переменных параметров упругости. Каждый шаг состоит в минимизации каким-либо прямым методом функционалов, получаемых последовательным варьированием вектор-функций.

Приведены численные примеры.

АСПЕКТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ СТРУКТУРНО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД И КОНСТРУКЦИЙ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ

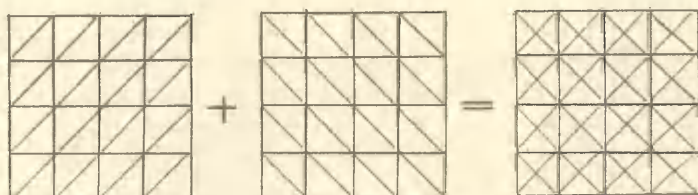
Картвелишвили В.М.

Расширение возможностей вычислительной техники позволяет в настоящее время все шире и эффективнее внедрять численное моделирование и исследование различных макро и микромеханических аспектов поведения сред и конструкций, структурная неоднородность которых обусловлена наличием одиночных или регулярно расположенных концентраторов напряжений. К данному классу структур относятся армированные волокнами композиты, пористые материалы, железобетонные конструкции, различные конструктивные элементы с концентраторами напряжений, образовавшимися в результате технологической обработки (перфорация) или в процессе эксплуатации конструкции (появление трещин).

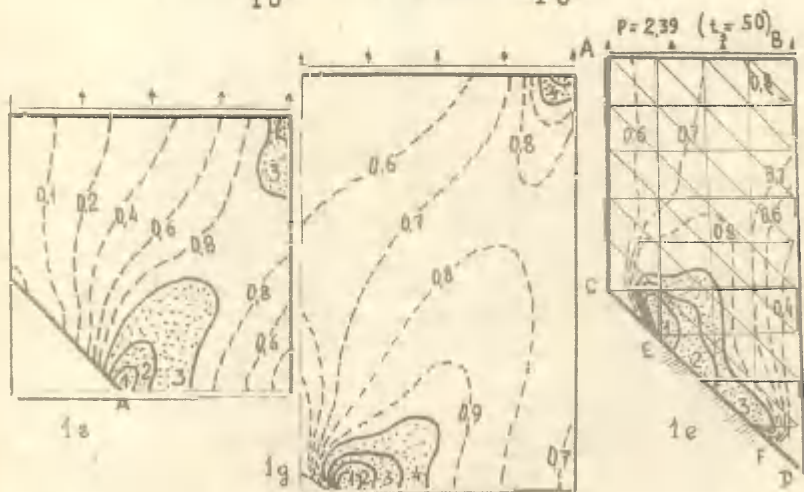
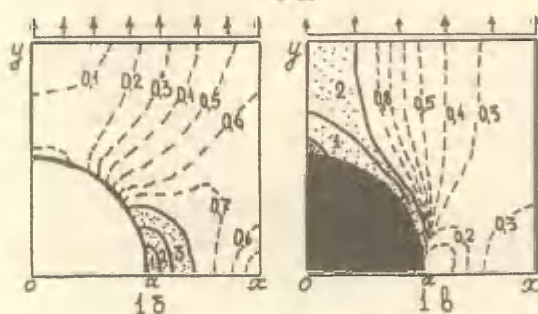
В работе на основе модели идеально-упруго-пластического деформирования с законом текучести Прандтля-Рейсса и критерием текучести Хилла (Мизеса), используя выпуклые вариационно-разностные схемы на треугольных сетках (рис. 1а), численно исследуется особенности развития пластических зон в элементах, выполненных из композитного материала с абсолютно жесткими включениями (рис. 1в) пористого материала (рис. 1б) или имеющих концентраторы напряжений различной формы (рис. 1г-1е). Пластические области на рисунках графически выделены, сплошные линии отвечают последовательным границам зон пластического течения.

В частности, пластические деформации в окрестности полого концентратора напряжений впервые возникают на границе полости в точке $x = a$, $y = 0$ и распространяются вдоль полости и оси Ox . Для композита, армированного абсолютно жесткими волокнами, пластические зоны возникают в матрице вблизи границы волокно-матрица приблизительно по углам $20^\circ - 30^\circ$ к оси Oy . Зоны пластической деформации при последующих нагружениях распространяются вдоль волокна и оси Oy . Для пластины, моделирующей панель скошенного крыла и растягиваемой по стороне АВ (рис. 1е), пластическая зона впервые возникает в окрестности точки Е. Концентраторы напряжений в виде выреза (1г) и трещины (1д) вызывают пластическое течение в окрестности точек А.

Расчёты проводились совместно с В.Д.Фроловым.



1a



О ДИНАМИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ КРУГЛОЙ ПЛАСТИНЫ В СОПРОТИВЛЯЮЩЕЙСЯ СРЕДЕ

Качалов И.В., Листрова Ю.П., Потапов В.Н.

Рассматривается деформирование круглой шарнирно опертой пластины, находящейся в сопротивляющейся среде и нагруженной равномерным давлением P , приложенным в момент времени

$T=0$, сохраняющим постоянную интенсивность при $0 < T < \tau$ и снятым в момент времени $T=\tau$. Материал пластины предполагается жестко-пластическим и подчиняющимся условию пластичности максимального приведенного напряжения

$$\max [|\sigma_1 - \sigma|, |\sigma_2 - \sigma|, |\sigma_3 - \sigma|] = 2\sigma_0/3, (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3 = \sigma_0.$$

Здесь $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ — главные напряжения, σ_0 — предел текучести материала при растяжении.

Уравнение движения пластины с учетом пропорциональных скорости сил сопротивления, а также скорости кривизн χ, λ срединной поверхности пластины имеют вид

$$(\rho m)_{\rho} - n = - \int_0^R (q - w_{tt} - \gamma w_t) \rho d\rho; \quad \chi = -M_0 \tau w_{\rho t} / (\mu R^4) \\ \lambda = -M_0 \tau w_{\rho t} / (\mu R^4 \rho)$$

Здесь $m = M/M_0, n = N/M_0, M_0 = \sigma_0 h^2/4, \rho = r/R, q = PR^2/M_0, w = \mu R^2 W^*/(M_0 \tau^2), \gamma = \alpha \tau/\mu, t = T/\tau,$

а величины $h, R, W^*, M, N, \mu, \alpha$ представляют собой соответственно толщину, наружный радиус и прогиб пластины, радиальный и окружной изгибающие моменты, массу, приходящуюся на единицу площади, и коэффициент пропорциональности при силе сопротивления.

Динамические пластические деформации в пластине возникают при $q > q_0$, где $q_0 = 6,84$ — предельная нагрузка, соответствующая потере несущей способности пластины.

Рассматривается динамическое поведение пластины для нагрузки, изменяющейся в пределах $q_0 < q < 7,85 q_0$. При этом существуют две фазы деформирования пластины.

Первая фаза: $0 < t < 1$. В этой фазе области $0 \leq \rho \leq \xi$ соответствует пластическое состояние $m+n=2$, а области $\xi < \rho < 1$ соответствует состояние $2n-m=2$, при этом радиус раздела пластических состояний ξ не зависит от времени t .

В силу ассоциированного закона течения скорости кривизн χ , λ связаны между собой следующими соотношениями:

$$\chi - \lambda = 0, 0 \leq \rho < \xi; \quad 2\chi + \lambda = 0, \xi < \rho \leq 1.$$

Путем подстановки в эти соотношения выражений для χ , и интегрирования полученных уравнений с использованием условий непрерывности $w_t(\rho, t)$, $w_{\rho t}(\rho, t)$, при $\rho = \xi$ и условий $w_t(0, t) = 0$, $w(\rho, 0) = 0$, $w(0, t) = W(t)$ определено поле прогибов w , пропорциональных прогибу центра пластины $W(t)$.

Интегрирование уравнения движения с учетом выражений для n , w , условия непрерывности радиального изгибающегося момента $m(\rho)$ при $\rho = \xi$, граничных условий $m(0) = 1$, $m(\xi) = 2/3$, $m(1) = 0$ определяет поле момента m и соотношения для q и $(W_{tt} + \delta W_t)$ как функции ξ . Из последнего соотношения при начальных условиях $W(0) = W_t(0) = 0$ находится прогиб центра пластины $W(t)$.

Вторая фаза: $1 < t < t^*$. В течение этой фазы нагрузка равна нулю, при $t = t^*$ пластина переходит в состояние покоя $w_t(\rho, t^*) = 0$. Здесь реализуются те же пластические состояния, однако радиус раздела пластических состояний ξ зависит от времени t .

В отличие от первой фазы переменность ξ не позволяет получить конечные соотношения для прогиба пластины $w(\rho, t)$.

Из соотношений для χ , λ определяется в конечном виде только поле скоростей прогибов $V(t)$, пропорциональных скорости прогиба центра пластины $w_t(\rho, t)$, решение же уравнения движения приводит к системе двух нелинейных дифференциальных уравнений относительно $\xi(t)$, $V(t)$.

Поле прогибов пластины определяется численным интегрированием от скоростей прогибов.

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КРУГОВЫХ ПЛАСТИН С УЧЁТОМ УПРОЧНЕНИЯ

Кире Ю., Кенк К.

Рассматривается оптимальное проектирование шарнирно-опёртой круговой пластины, нагруженной равномерным давлением P . Поверхность текучести принимается в форме Мизеса, и материал считается изотропно упрочняющимся. Требуется определить – при заданном объёме пластины и её толщине на краю – такое распределение толщины, при котором максимальный прогиб пластины минимален.

Рассматриваются два случая, которые отличаются между собой применяемой нагрузкой и моментом времени, когда производится минимизация прогиба.

В первом случае нагрузка имеет постоянное значение P_0 в промежутке времени $0 \leq t \leq t_1$ и затем мгновенно снимается. Минимизация прогиба производится в момент $t = t_1$.

Во втором случае нагрузка P – экспоненциально убывающая функция

$$P = P_0 e^{-\eta t},$$

где P_0 и η – постоянные нагружения. Минимизация выполнена для конечного момента $t = t_3$, когда движение пластины прекращается.

Закон изотропного упрочнения материала принимается в виде

$$\sigma_3 = \sqrt{\frac{3A_p}{B} + \sigma_{s0}^2},$$

где σ_{s0} – исходный предел текучести, A_p – пластическая работа и B – постоянная материала.

Функция толщины $H(r)$ определяется в виде полинома. Для определения прогиба W применяется метод модальных решений

$$W = \varphi(\tau) \cdot f(x),$$

где τ – безразмерное время, x – безразмерная координата пластины.

Результаты расчёта сравниваются с соответствующими результатами, полученными без учёта упрочнения.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

Кислоокий В.Н., Зверев А.А., Потешкин С.А.

Проблема контактного взаимодействия деформируемых тел является одной из наиболее важных при оценке прочности инженерных конструкций и технических объектов. Особая сложность заключается в том, что, за исключением редких частных случаев, не представляется возможным получить удовлетворительное решение динамических задач пластического импульсного деформирования ни аналитическим путем, ни с помощью эксперимента.

Предлагаемая методика численного исследования пластического деформирования осесимметричных оболочек при контактных динамических воздействиях основана на принципах метода конечных элементов. В качестве разрешающих уравнений используются соотношения, полученные методом Канторовича из зависимостей трехмерной теории путем разложения перемещений по толщине. Координатные функции представляют собой почти ортонормированные интегральные полиномы Лежандра совместно с интерполяционными полиномами Лагранжа.

Работа материала взаимодействующих тел описывается соотношениями теории пластического течения. Кроме того, ранее было исследовано, что поведение пластической среды, находящейся в условиях сложного нагружения, наиболее точно описываются теорией течения, которая учитывает деформационную анизотропию материала. В соответствии с этим в настоящей работе принят вариант теории течения, учитывающий изотропное и трансляционное упрочнение среды. В качестве базового численного метода применяется моментная схема конечных элементов, отличительной особенностью которой является учет свойств жестких смещений в результате согласования коэффициентов полиномиальных представлений при аппроксимации как перемещений, так и деформаций. Для интегрирования уравнений движения конечноэлементной модели используется явная схема, позволяющая сравнительно просто

учесть геометрическую и физическую нелинейность на каждом временном шаге. Величина шага интегрирования не должна превышать времени пробега волной расширения половины наименьшего размера конечного элемента.

Сложность исследуемых задач потребовала использования принципов декомпозиции, состоящих в расчленении искомой области на фрагменты. На каждом из них наносится регулярная расчетная сетка - в узлах меридионального сечения пересекаются линии двух семейств. В целом же по области расчетная сетка является нерегулярной. Данный прием позволяет достаточно сильно сгущать сетки в контактирующих фрагментах и разрезать их по мере удаления от места приложения локальных воздействий. Таким образом, обеспечивается более точный расчет в зонах больших градиентов расчетных параметров / температур, ускорений, скоростей, перемещений / и концентрации напряжений, где предполагается пластическое поведение материала. Подобная структура расчетных сеток позволила, благодаря регулярности в пределах фрагмента, разработать оптимальную организацию оперативной информации и эффективные алгоритмы ее обработки в процессе расчета. Естественно, что шаги интегрирования в разных фрагментах будут различаться. Поэтому было математически исследовано состояние расчетных параметров на смежных границах соседних фрагментов и предложена методика коррекции граничных значений при условии взаимной вложенности временных шагов фрагментов конструкции. Введена следующая иерархия фрагментов. Ведущим по отношению к соседним называем тот, у которого временной шаг больше, и ведомым, если его шаг меньше. Максимальный шаг интегрирования определяет собой цикл обработки всей конструкции и назван макроциклом. За период данного шага для фрагментов каждого уровня иерархии выполняется свое количество циклов коррекции и обработки. На смежных границах соседних фрагментов сети могут быть как согласованные, так и несогласованные. В последнем случае решение ищется методом неопределенных множителей Лагранжа. Общее решение контактной задачи определяется путем анализа "перехлеста" смежных сеточных областей.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СДВИГОВЫХ ПРОЦЕССОВ СИММЕТРИЧНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Кобытев В.С., Колупаева С.Н.

1. Пластическая деформация является сложным самоорганизующимся многоуровневым процессом, происходящим в условиях постоянного взаимодействия деформируемого (деформированного) тела с окружающей средой. Вовлечение и развитие каждого последующего уровня деформации связано с потерей устойчивости предыдущим, число же уровней, вовлечённых в деформацию, связано с уровнем внешнего деформирующего напряжения и условиями деформирования. Естественным откликом деформируемого тела на внешнее воздействие является скорость пластической деформации $\dot{\alpha}$, величина которой при данном напряжении определяется степенью дефектности материала (плотностью дислокаций ρ , концентрацией деформационных точечных дефектов C_k — вакансий C_v , бивакансий C_{2v} , межузельных атомов C_i).

2. Таким образом, для описания пластической деформации необходимы уравнения, характеризующие внешнее воздействие

$$F_j(\tau, \alpha, T, \dot{\tau}, \dot{T}, \dot{\alpha}, \dots, t) = 0, \quad (1)$$

уравнение скорости пластической деформации

$$\dot{\alpha} = \dot{\alpha}(\tau, \rho, T, C_k) \quad (2)$$

и уравнения кинетики деформационных дефектов

$$\dot{\rho} = \dot{\rho}(\dot{\alpha}, \tau, T, \rho, C_k), \quad (3)$$

$$\dot{C}_k = \dot{C}_k(\dot{\alpha}, \tau, T, \rho, C_k).$$

В общем случае необходимо уравнение, описывающее скорость изменения температуры в процессе пластической деформации

$$\dot{T} = \dot{T}(\dot{\alpha}, \tau, T, \rho, C_k). \quad (4)$$

Явный вид системы уравнений кинетики пластической деформации получен из детального рассмотрения процессов, протекающих в зоне сдвига, и приведён в [1, 2]. Математическая модель, основанная на системе уравнений кинетики пластической деформации (1 — 4), позволяет описывать пластическое поведение деформируемого кристалла в различных условиях

(которые определяются первым уравнением системы). Система уравнений (1)–(4) является полной, и решение задачи Коши для неё позволяет получить связь между любыми парами переменных.

3. Из анализа устойчивости решений системы сформулирован обобщённый критерий устойчивости одноосной деформации, растяжения и сжатия. В случае положительной скоростной зависимости сопротивления деформированию и незначимости аннигиляционных процессов он переходит в известный критерий устойчивости Консидера. Описано развитие флуктуаций исходного состояния образца как в области устойчивости, так и за её пределами и показано, что конечная форма деформируемого тела несёт информацию об исходных флуктуациях сечения и концентрации деформационных дефектов.

4. Модель реализована для описания пластического поведения г.ц.к. материалов в условиях: а) деформации с постоянной скоростью, $\dot{a} = Const$; б) ползучести при постоянном сдвиговом напряжении, $\tau = Const$ и ползучести при постоянной нагрузке, $P = Const$; в) релаксации напряжений, $\dot{a} + a_e = Const$ (a_e – упругая деформация). Проведены расчёты зависимости поглощённой (скрытой) энергии деформации E от степени деформации и от напряжения, зависимости скорости выделения энергии dE/dT от температуры при постоянной скорости нагрева и $dE/dT = f(t)$ при изотермическом отжиге. Получено хорошее согласие соответствующих теоретических и экспериментальных зависимостей.

Литература

1. Попов Л.Е., Кобытев В.С., Ковалевская Т.А. Пластическая деформация сплавов. М.: Металлургия, 1984. – 182 с.
2. Кобытев В.С., Попов Л.Е. – В кн.: Структура и пластическое поведение сплавов. Томск: ТГУ, 1983, с.45 – 73.

УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ГИБКИХ ПЛАСТИН И ОБОЛОЧЕК ПРИ СЛОЖНЫХ ПРОГРАММАХ НАГРУЖЕНИЯ

Корнишин М.С., Столяров Н.Н., Райков Е.А.

На основе теории пластического течения с трансляционно-изотропным упрочнением, деформационной теории пластичности исследуются особенности нелинейного деформирования гибких прямоугольных в плане пологих оболочек и пластин при сложных программах нагружения. Исследованы двухпараметрические и трехпараметрические нагружения.

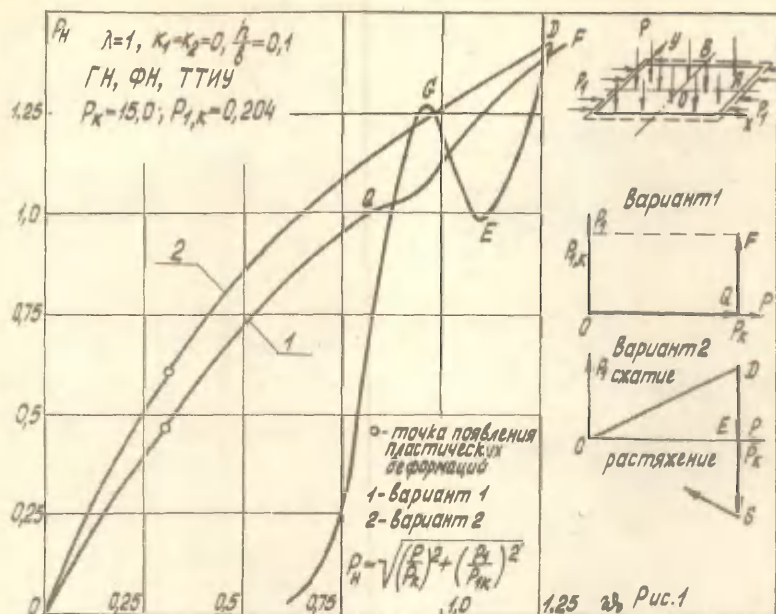
С использованием пятимерных девиаторных пространств А.А.Ильшина /1/ связь между вектором напряжений $\bar{\sigma}$ и вектором деформаций $\bar{\varepsilon}$ записывается в виде

$$d\bar{\sigma} = N d\bar{\varepsilon} - (N - \rho) \frac{\bar{\sigma}^* d\bar{\varepsilon}}{\bar{\sigma}^*} \cdot \frac{\bar{\sigma}^*}{\bar{\sigma}^*}, \quad (1)$$

где $\bar{\sigma}^*$ - вектор активных напряжений, N , ρ - материальные функции, выбор которых обеспечивает расчет по различным теориям пластического течения и по деформационной теории.

Используя основные соотношения нелинейной теории оболочек, получаем разрешающую систему дифференциальных уравнений, записанную в приращениях. Нелинейные двумерные краевые задачи решались на основе методов конечных разностей, приращений, двухступенчатого. В двухступенчатом методе используются операторы, эквивалентные по спектру, метод переменных направлений в качестве внутреннего итерационного процесса, для оптимизации которого применялись параметры Вакспреса.

Двухпараметрические и трехпараметрические нагружения пластин и оболочек осуществлялись поперечной нагрузкой, характер которой менялся в процессе деформирования, либо комбинацией продольной и поперечной нагрузок. На конкретных примерах исследовано напряженное состояние, прогибы, конфигурация траекторий напряжений и деформаций в зависимости от пути нагружения. Для пластин при активных путях нагружения, приводящих в одну точку плоскости нагрузок (ρ, ρ_1) (рис.1), различие в напряжениях и прогибах в этой точке небольшое. Это различие возрастает, если один из путей активный, а на другом - реализуется активное нагружение и разгрузка.



Установлено, что при рассмотренных двухпараметрических нагружениях траектории напряжений и деформаций близки к двухзвенным и полученные результаты можно рассматривать как первую итерацию метода СН-ЭВМ. Смена характера нагружения соответствует точке излома в этих траекториях. Для пластин, находящихся под действием комбинаций продольной P_1 и поперечной нагрузок P , ортогональному пути в плоскости (P, P_1) соответствуют траектории деформаций с углами излома не более 30° .

На рис. 1 для гибкой шарнирно опертой пластины приведена зависимость модуля нагрузки P_H от прогиба в центре для двух путей нагружения. Использована теория течения с изотропным упрочнением.

Литература

1. Ильин А. А. Пластичность. Основы общей математической теории. — М.: АН СССР, 1963. — 272 с.
2. Муштари Х. М., Галимов К. З. Нелинейная теория упругих оболочек. Казань: Татарский издат, 1957. — 431 с.

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ СТРУКТУРНОЙ ТЕОРИИ ПЛАСТИЧНОСТИ

Короткина М.Р.

Предложена математическая модель, позволяющая описать процессы пластического течения с учётом изменения структуры. Предполагается, что процесс пластического течения начинается с деформации внутри зёрен, затем начинается деформация самих зёрен. Развитая стадия процесса пластического течения начинается тогда, когда появляется скольжение по границам зёрен.

Построена математическая модель, описывающая все стадии поведения пластического течения. Модель содержит несколько структурных параметров. Поведение структурных параметров во времени описывают кинетические уравнения.

Предложен метод построения термодинамических функционалов, описывающих пластическое течение. Найдена явная аналитическая зависимость ядер, определяющих пластическое течение, от структурных параметров. Впервые удалось математически описать петлю гистерезиса и получить для неё зависимость от структурных параметров.

ДИНАМИКА УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ СО СРЕДАМИ

Котляревский В.А., Костин А.А.

Разработан для ОС ЕС ЭВМ комплекс программ **ЭФФЕКТ** динамического расчета конструкций произвольной формы, контактирующих со средами различного типа, на сейсмические, взрывные и ударные воздействия.

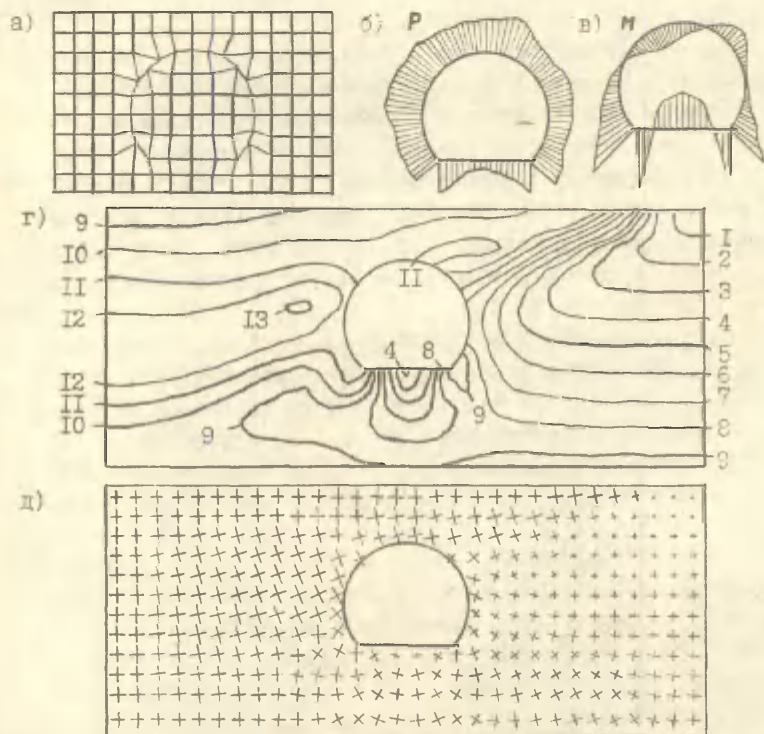
Задача сформулирована в двумерной постановке (плоская деформация). Массивная конструкция моделируется как зона, выделенная в области решения. Элементы тонкостенных конструкций аппроксимируются системой дискретных (стержневых) элементов. Допустимо описание реологии сред и конструкционных материалов с использованием упруговязких и упругопластических моделей различного типа, в том числе учитывающих скоростные (временные) эффекты на основе интегрального критерия кинетического типа.

Система уравнений волновой динамики в переменных Лагранжа решается явным конечно-разностным методом типа «крест» (сквозной счет с искусственной тензорной вязкостью) на расчетной сетке с четырехугольной ячейкой произвольной формы. Контур конструкции согласуется с ребрами ячеек сетки. Допустимы произвольные граничные условия динамического и кинематического типа по контуру области решения, а также возмущения от внутренних источников энергии. Верхняя граница области может быть криволинейной. В области решения допустимы зоны с различными механическими свойствами. В зависимости от геологии, наличия скальных пород и водных прослоек грунт может быть представлен моделями, допускающими комбинацию фундаментальных свойств твердого деформируемого тела (упругость, вязкость, пластичность) и жидкой среды.

Для определения усилий в конструкции используется метод слоистой балки, в связи с чем возможен расчет композитных и железобетонных конструкций. Начальные напряжения в среде и конструкции от действия силы тяжести определяются методом конечных элементов. Расчет может выполняться для ус-

ловий осевой симметрии. Предусмотрена выдача на графопостроитель параметров движения и напряженно-деформированного состояния среды и конструкции в виде изолиний, эпюр, векторных полей и осей главных напряжений.

С помощью комплекса ЭФФЕКТ проведены расчеты подземных и гидротехнических сооружений, а также отдельных элементов конструкций, примеры которых рассматриваются.



Выданные на графопостроитель результаты расчета железно-дорожного туннеля на действие промышленного взрыва для $t = 30$ мс: а) фрагмент расчетной сетки; б) и в) эпюры давлений взаимодействия (P) и изгибающих моментов (M); г) линии равных вертикальных напряжений; д) оси и величины главных напряжений в грунте. Материал обделки туннеля — железобетон.

ЛОКАЛИЗОВАННОЕ В ВЕРШИНЕ ТРЕЩИНЫ ПЛАСТИЧЕСКОЕ ТЕЧЕНИЕ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

Красовский А.Я.

В условиях нагружения, вызывающих хрупкие разрушения тел с трещинами, поля напряжений в окрестности вершины дефекта характеризуются особенностью типа r^{-1} для плотности энергии деформации, где r — расстояние до вершины трещины. Указанная особенность предопределяет характер изменения напряжений и деформаций в пределах малой пластической зоны в вершине в зависимости от вида реальной диаграммы деформирования материала. Однако на расстояниях до вершины порядка нескольких раскрытий трещины в связи с геометрическими изменениями вершины (пластическое затупление) указанная особенность нарушается. Оценки различными методами характера нарушения приводят к заключению, что в этой области распределение нормальных к плоскости трещины растягивающих напряжений претерпевает экстремум (максимум). С положением данного максимума связывает обычно место начала разрушения в вершине трещины при ее катастрофическом росте. Очевидное для однородного материала, это положение не является бесспорным для материала реального, т.е. микронеоднородного.

Как показывает эксперимент, начало разрушения в вершине трещины в конструкционных материалах происходит в местах расположения структурных неоднородностей (границ зерен, неметаллических включений, выделений вторых фаз и т.п.), которые не обязательно совпадают с положением пика напряжений. В соответствии с этим предложена модель механизма разрушения, заключающаяся в образовании при некотором критическом для данного материала локальном напряжении микротрещины на характерном расстоянии от вершины трещины, определяемом структурой материала. Модель механизма и его экспериментальное подтверждение послужили физической основой для аналитического описания хрупкого разрушения металлов как процесса, контролируемого образованием и развитием пластической зоны в вершине трещины.

Получены выражения в явном виде для связи трещиностой-

кости как механического свойства материала с условиями нагружения (температура, скорость нагружения) и его структурой. Рассмотрены такие условия начала стабильного докритического роста трещины.

Природа вязко-хрупкого перехода в металлах в рамках указанной модели связана с необходимостью достижения критического состояния в вершине трещины при определенном относительном (по отношению к характерному размеру образца) размере пластической зоны в момент начала разрушения. При такой трактовке вязко-хрупкого перехода его критические температуры, устанавливаемые по различным методикам и на различных образцах, отличаются единственным параметром — относительным размером пластической зоны — и могут быть сопоставлены между собой. Поскольку при этом размер пластической зоны соотносят с линейным размером образца, естественным образом проявляется масштабный эффект при вязко-хрупком переходе.

Экспериментальная проверка на ряде отечественных сталей, а также сопоставление с данными многочисленных авторов показали хорошее согласие теории и эксперимента. Это позволило предложить ряд простых, но полезных на практике соотношений для определения трещиностойкости по критическим температурам хрупкости и наоборот. Указанные соотношения, например, облегчают оценку температурных зависимостей трещиностойкости облученных материалов по известным температурам хрупкости; позволяют прогнозировать температуру хрупкости крупногабаритных образцов или деталей по результатам определения температур хрупкости на малых лабораторных образцах; дают возможность простого пересчета температур хрупкости, определяемых по одним методикам, в другие температуры хрупкости; позволяют прогнозировать влияние на температуру хрупкости скорости нагружения и других факторов. Логическое объяснение в рамках предложенной модели находит и факт влияния размеров образцов на закономерности вязко-хрупкого перехода (так называемый масштабный эффект).

ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ НАГРЕВЕ КОНСТРУКЦИЙ

Кривилев В.А.

Интенсификация промышленного производства зачастую сопряжена с увеличением температурных параметров технологических процессов, что приводит к возникновению в конструкциях сложного термонапряженного состояния.

Возникающее в системах нестационарное поле температур является источником термоупругих, медленных термоупругих и термопластических волн, распространяющихся от нагреваемого участка. Специфика движения волн изучается экспериментально в условиях локального нагрева замкнутых железобетонных рам с фиксированием температур и напряжений, а теоретически – с применением волновых сеток. В связи с распространением поля температур по двум координатам происходит перераспределение напряжений в системе. Смещение повышенных температур за счет теплопроводности в центр сечения элемента конструкции приводит к тому, что упругое ядро изменяет свою конфигурацию и разрушение рамы может наступить не по традиционной схеме при значительно меньших параметрах механической нагрузки.

Совместное действие механической и локальной тепловой нагрузок в ряде случаев приводит к возникновению пластических шарниров в стержневых системах в местах, где сжимающие напряжения от медленных термоупругих волн напряжений и от напряжений механического нагружения суммируются.

Обращается особое внимание на изменение при нагреве физико-механических характеристик материалов, из которых изготовлены конструкции. Резкое снижение величины модуля упругости оказывает существенное влияние не только на общую картину упруго-пластического состояния системы, но и на характер распространения волн.

Повышение надежности конструкций может быть обеспечено лишь при учете динамики возможной схемы ее нагрева нестационарными тепловыми источниками.

КОЛЛЕКТИВНЫЕ ДИСЛОКАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ РОТАЦИОННОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ В КРИСТАЛЛАХ ЦИНКА

Лаврентьев Ф.Ф., Гектин А.В., Гектина И.В.

Работа посвящена изучению особенностей пластической деформации монокристаллов цинка, ориентированных для пирамидального скольжения, когда базисное скольжение максисально затруднено. Оказалось, что в такой ситуации происходит смена механизма пластической деформации – наблюдается эффект сбросообразования. Увеличение уровня напряжения приводит к возникновению локально неустойчивого состояния структуры. Однако невозможность релаксации напряжений за счет скольжения через весь образец приводит к релаксации системы посредством локальных ротационных эффектов (в частности, образования и развития полос сброса), наблюдаемых уже на ранних стадиях пластической деформации. Исследование природы такой неустойчивости и связи между трансляционными и ротационными процессами в ходе сбросообразования проведено в рамках анализа морфологии полос сброса (ПС) и кинетики их формирования.

Исходные образцы монокристаллов Zn (чистота 99,99%, плотность базисных дислокаций – $5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$, пирамидальных – $5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2}$) ориентировались для сжатия вдоль $[11\bar{2}0]$ так, что угол между плоскостью базиса и осью нагружения не превышал 30° . Деформирование в интервале $20 - 400^\circ\text{C}$ проводилось на машине "Инстрон" в высокотемпературной камере с параллельной записью кривой деформационного упрочнения и фоторегистрацией изменения формы образца.

Основные экспериментальные результаты состоят в следующем.

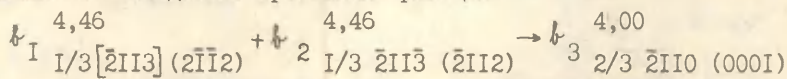
1) Показано, что в диапазоне $150 - 300^\circ\text{C}$ деформация происходит путем сбросообразования.

2) Обнаружен новый тип полос сброса, характеризующийся непостоянством углов разориентации (θ) вдоль границ, ограничивающих область локализации скольжения.

3) Установлены закономерности изменения угла θ по мере роста величины пластической деформации. Показано, что изменение всей системы границ, образующих ПС, имеет самосогласованный характер.

4) Исследование локализации скольжения внутри образовавшейся полосы сброса обнаружило, что существуют предельные значения θ , до которых происходит разворот решетки внутри ПС. $\theta \approx 30^\circ$ соответствует специальной границе для монокристаллов цинка. В дальнейшем пластическая деформация развивается за счет появления новой полосы сброса в области, прилегающей к уже сформировавшейся ПС.

Пространственная ориентация границ между ПС и остальной частью кристалла такова, что может быть реализована только с помощью базисных дислокаций. Анализ дислокационных взаимодействий позволяет высказать предположение о возможности массового зарождения базисных дислокаций в ходе пирамидального скольжения вследствие протекания реакции



где b_1 , b_2 и b_3 – векторы Бюргерса исходных и результирующих дислокаций, справа сверху приведены относительные энергии дислокаций, внизу – индексы векторов Бюргерса и плоскостей залегания дислокаций.

Совокупность внешних (инструментальных) и внутренних (структурных) факторов определяет место и момент появления ансамбля базисных дислокаций. Пространственное «разделение» таких дислокаций формирует границы ПС. Возможность такого «разделения» базисных дислокаций обусловлена возникновением в плоскостях базиса напряжений вследствие небольшой погрешности ориентации образца и локальных искривлений плоскостей (0001) в местах пересечения полос пирамидального скольжения. Как показали оценки, эти напряжения могут оказаться достаточными для движения базисных дислокаций.

Таким образом, исследование особенностей процесса сбросообразования свидетельствует о существенности и взаимосвязи трансляционных и ротационных эффектов при пластической деформации кристаллов цинка. Предлагаемая дислокационная модель в силу скоротечности процесса образования полосы сброса указывает на важную роль коллективных дислокационных эффектов в рассматриваемом явлении.

ПРИМЕНЕНИЕ ДИСКРЕТНО-КОНТИНУАЛЬНОЙ ФОРМЫ МКЭ ДЛЯ РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧ ПЛАСТИЧНОСТИ

Лантух-Лященко А.И., Снитко А.Н.

Метод конечных элементов (МКЭ), обладая универсальностью, имеет существенный недостаток, заключающийся в необходимости решать системы линейных уравнений высокого порядка. Для конструкций, вытянутых вдоль одной из координат при введении ряда предпосылок можно избежать большой густоты сетки вдоль длинной стороны. Этот прием используется в дискретно-континуальном методе (ДКМ), представляющим объединение аппарата МКЭ и идеи дискретно-континуального решения Власова-Канторовича.

Для двумерной области (будем рассматривать достаточно распространенный класс задач – тонкие плиты) координатные функции ДКМ можно представить в виде

$$w = \sum_{i=1}^K X(x) Y(y) q_i, \quad (1)$$

где q_i – степени свободы, общее количество которых для одного элемента – K .

Кроме требований полноты, линейной независимости и принадлежности к энергетическому пространству дифференциального оператора \mathcal{A} , на функции $Y(y)$ налагается требование удовлетворения обыкновенному дифференциальному уравнению.

Так, для задачи изгиба пластин в качестве функции Y используются собственные функции уравнения

$$\mathcal{A} w - \lambda w = 0; \quad \mathcal{A}_0 = \frac{d^4}{dy^4}. \quad (2)$$

Оценим точность решения задачи по ДКМ. Пусть элемент занимает область $\Omega = [0, b] \times [0, L]$. Энергетическая норма оператора \mathcal{A}_0 на основе (2) имеет вид

$$\|w\|_{\mathcal{A}_0}^2 = a_0(w, \bar{w}) = \int_0^L \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} \right) dy. \quad (3)$$

Из полноты собственных функций следует, что

$$w = \sum_{k=1}^{\infty} (w, \gamma_k) \gamma_k, \quad (w, \gamma_k) = \frac{1}{\lambda_k} (f, \gamma_k), \quad (4)$$

откуда вытекает следующая оценка:

$$\begin{aligned} \|w - w_N\|_{\mathcal{A}_0}^2 &= \sum_{k=N+1}^{\infty} (w, \gamma_k)^2 \frac{1}{\lambda_k} \leq \frac{1}{\lambda_{N+1}} \sum_{k=N+1}^{\infty} (f, \gamma_k)^2 \leq \\ &\leq \frac{1}{\lambda_{N+1}} \|f\|_{L_2}^2 \leq \frac{C}{N^2} \|f\|_{L_2}^2. \end{aligned} \quad (5)$$

После некоторых преобразований для приближенного решения ДКМ можем получить следующие оценки:

$$\begin{aligned} \|w - w_{\mathcal{A}, N}\|_{\mathcal{A}} &\leq C \cdot \max \{ N^{-2}, \theta^2 \} \\ \|w - w_{\mathcal{A}, N}\|_{L_2} &\leq C_1 \cdot \max \{ N^{-2}, \theta^2 \}. \end{aligned} \quad (6)$$

Эти оценки переносятся на нелинейные задачи при выполнении условия $0 < \kappa_1 \leq \frac{d\mathcal{A}}{d\varepsilon_i} \leq \kappa_2 < \infty$.

При этом дифференциальный оператор задачи $\mathcal{A}(u)$ является строго монотонным, т.е. выполнено неравенство

$$(\mathcal{A}(u_1), u_1 - u_2) - (\mathcal{A}(u_2), u_1 - u_2) \geq \kappa \|u_1 - u_2\|_{N_2}^2. \quad (7)$$

Из совместности координатных функций (I) следуют оценки

$$\begin{aligned} \|u - u_{\mathcal{B}, N}\|_{W_2} &\leq C_2 \|u - u_{\mathcal{B}, N}\|_{N_2} \leq C \cdot \max \{ N^{-2}, \theta^2 \} \\ \|u - u_{\mathcal{B}, W}\|_{L_2} &\leq C \cdot \max \{ N^{-4}, \theta^4 \}. \end{aligned} \quad (8)$$

Эти оценки аналогичны оценкам ДКМ для линейного случая. Полученные оценки (8) свидетельствуют о высокой скорости сходимости дискретно-континуального метода. Оценки (8) проверялись численными экспериментами. Рассчитывались прямоугольные плиты с различным соотношением сторон. Результаты расчетов подтвердили теоретические выводы.

УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРНО- НЕСТАБИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Лебедев А.А., Ковальчук Б.И., Косарчук В.В., Зайцева Л.В.

В ответственных элементах конструкций, работающих в условиях сложного напряженного состояния в широком диапазоне температур, находят широкое применение нержавеющие хромоникелевые стали. Характерной особенностью низкотемпературного деформирования указанных сталей является наличие деформационных фазовых превращений, обусловленных степенью метастабильности исходной структуры и условиями температурно-силового нагружения.

В докладе обсуждаются результаты экспериментального исследования законов упругопластического деформирования хромоникелевых сталей типа 18-10 в условиях сложного напряженного состояния. Опыты выполняли на цилиндрических сплошных (растяжение, сжатие, кручение) и тонкостенных трубчатых (пропорциональное нагружение осевой силой и внутренним давлением) образцах, изготовленных из сталей 07X18H10T и 07X18H12T.

Деформирование данных сталей при температурах 173K и 77K сопровождается мартенситным превращением, которое существенно влияет на характер деформационного упрочнения и повышает прочностные характеристики материала. Показано, что кинетика мартенситного превращения зависит от вида напряженного состояния, что приводит к расхождению обобщенных кривых деформирования, однако условие пропорциональности девиаторов напряжений и пластических деформаций выполняется.

Получены уравнения состояния метастабильных материалов, учитывающие количество и прочность вторичной фазы. На основании установленной связи параметров структуры с характеристиками вида напряженного состояния сформулированы определяющие соотношения деформационной теории пластичности структурно-нестабильных материалов для случая пропорционального нагружения. Получено хорошее соответствие расчетных и экспериментальных кривых деформирования.

ТЕОРИЯ И РАСЧЕТ СЖАТЫХ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Лебедев В.А., Санжаровский Р.С.

Рассматривается метод расчета сжатых упруго-пластических стержней на динамические нагрузки в случае монотонно возрастающего нагружения. Время действия нагрузки считается значительно большим времени прохождения волн сжатия по длине стержня. Волновые эффекты при этом можно не учитывать. Продольные силы инерции, возникающие вследствие сближения концов стержня, и силы инерции вращения сечений также не учитываются, что идет в запас прочности. Изогнутая ось стержня аппроксимируется интерполяционным полиномом Лагранжа по конечному числу точек.

Движение элемента описывается системой дифференциальных уравнений в нормальной форме Коши.

Для исследования устойчивости движения в произвольный момент времени рассматривается отклонение стержня от невозмущенного движения. Критерий потери устойчивости получается из условия равенства приращений работ внешних и внутренних сил на перемещениях, вызванных отклонением от невозмущенного движения.

Экспериментальные исследования подтвердили теоретические расчеты. Установлено, что повышение несущей способности стержней может достигать 300% по сравнению со статическим нагружением. Данные расчетов отличаются от экспериментальных данных на 1 ... 15%, причем наибольшее расхождение наблюдается при наивысших скоростях нагружения.

Расчеты для стального квадратного стержня гибкостью 80, сжатого с относительным эксцентриситетом 1.52, с начальной нагрузкой 0.1 Т и имеющего статический предел текучести 24 кН/см² показали, что повышение несущей способности стержней при динамическом нагружении обусловлено двумя факторами: повышением прочностных свойств материала и силами инерции. Дается оценка влияния каждого фактора в зависимости от скорости нагружения.

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ КРИОКРИСТАЛЛОВ

Леонтьева А.В., Романуша В.А., Стрельцов В.А.

Криокристаллами в настоящее время принято считать группу веществ, газообразных при комнатной и твердых при низких температурах. К ним прежде всего можно отнести атомарные ГЦК криокристаллы (Ne , Ar , Kr , Xe) с ван-дер-ваальсовым типом связи. Пластическая деформация и разрушение этих кристаллов существенно отличается от таковых для ГЦК металлов [1-2]. Проведенный к настоящему времени комплекс исследований свидетельствует о следующих отличительных особенностях.

ГЦК-криокристаллы имеют хрупко-пластический переход, который происходит практически в температурной точке $-T_0$. Пластическая деформация с постоянной скоростью $\dot{\epsilon}$ при $T < T_0$ протекает однородно по всему образцу. Визуально делокализация деформации наблюдается вплоть до разрушения. Вид излома соответствует хрупкому разрушению. Деформация до разрушения ϵ_f монотонно растет с температурой испытания и достигает вблизи T_0 нескольких процентов. При $T = T_0$ наступает резкая смена характера деформации и разрушения. Деформация ϵ_f при $T > T_0$ становится большой, разрушение протекает с ярко выраженной шейкой и носит вязкий характер. Увеличение $\dot{\epsilon}$ приводит к смещению T_0 в область более высоких температур. Исследования подзучести показывают, что при температуре T_0 происходит смена механизмов деформации от низкоэнергетического пайерсовского к высокоэнергетическому диффузионному. О переходе к диффузионному механизму деформации при $T > T_0$ свидетельствуют также данные по низкочастотному внутреннему трению [3]. В таблице приведены параметры пластичности и разрушения криокристаллов.

крио- кристалл	$T_{пл}, K$	$T_0/T_{пл}$	$\Delta T,$ K	ϵ_f $T < T_0, \%$	ϵ_f $T > T_0, \%$	$\mu_{T < T_0}$ ккал моль	$\mu_{T > T_0}$ ккал моль
Ne	24,5	0,43	1±2	4	20	0,04	0,4
Ar	83,8	0,67	1±2	9	20	0,2	3,0
Kr	110,6	0,70	3±5	10	30	0,16	2,5
Xe	161,4	0,71	3±5	10	20	0,3	2,6

Здесь $U_{T < T_0}$ и $U_{T > T_0}$ — энергия активации процесса до и после смены механизма деформации, который происходит в области температур ΔT , величины предельной деформации ε_f взяты вблизи температуры T_0 до и после смены механизма. Значения T_0 , ΔT и ε_f соответствуют скорости деформации $\dot{\varepsilon} = 5,5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$.

Характер сил межатомного взаимодействия прежде всего отражается на свойствах дислокаций. В кристаллах энергии дефектов упаковки γ низки (для Al $\gamma \approx 0,7 \text{ эрг/см}^2$, а у Fe $\gamma < 1 \text{ эрг/см}^2$), дислокации сильно расщеплены, а напряжения Пайерлса σ_p составляют $\sigma_p < 10^{-5} \mu$ (μ — модуль сдвига), ширина расщепления $d \approx 100a$ (a — параметр решетки). Сделан вывод о свойствах дислокаций.

На основе экспериментальных данных предлагается модель хрупко-пластического перехода, в основе которой рассматривается конкуренция двух процессов: формирования критической трещины и процесса диффузионного заплывания устья трещины, вблизи которого существует концентрация напряжений, способная привести образец к разрушению. Используя данные работы [4], получим выражение, из которого определяется энергия активации этого процесса

$$U_0 = -T_0 \ln \left(\frac{\chi}{\varepsilon_f} \frac{\dot{\varepsilon}}{\omega_d} \frac{T_0}{\Omega K} \frac{E^2}{\sigma_T^2} \right),$$

где χ — множитель ≈ 10 , ω_d — дебаевская частота, Ω — объем вакансий, K, E — модуль всестороннего сжатия и Юнга соответственно, σ_T — теоретическая прочность. Оценка U_0 находится в удовлетворительном согласии с экспериментальными данными (см. таблицу).

1. Леонтьева А.В., Романуша В.А., Степанчук Л.В., Фельдман Э.П. УФН, 28, № 7, 1025, 1983.
2. Большуткин Д.Н., Кулик Н.Ф., Леонтьева А.В. и др. Тр. ФТИНТ, ФНТ, вып. 9, 1972.
3. Маринин Г.А., Леонтьева А.В., Оберемченко И.А., Стрельцов В.А. ФТТ, 25, № 8, 1850, 1983.
4. Косевич А.М., Фельдман Э.П., Стрельцов В.А. ФТТ, 26, № 10, 3006, 1984.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКОГО ИЗГИБА И ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЖЕСТКОПЛАСТИЧЕСКИХ БАЛОК СТУПЕНЧАТО-ПОСТОЯННОЙ ВЫСОТЫ

Легикулт Т.А.

Рассматривается задача о жесткопластическом изгибе и оптимальном проектировании балок кусочно-постоянной высоты под действием динамических нагрузок. Нагрузка состоит из поперечного давления, распределенного произвольным образом, и сосредоточенных нагрузок. Концы балки могут быть свободно опертыми, жестко заземленными или совсем свободными.

При решении такого рода задач основные затруднения возникают при выборе подходящей комбинации пластических шарниров. До сих пор делали это в основном по интуиции, но такой путь требует часто лишних хлопот.

С целью автоматизирования этой работы на кафедре теоретической механики ТГУ разработан ряд пакетов программ на ЭВМ. Один из них составлен автором данного доклада.

Задача изгиба приводится к интегрированию квазилинейной системы обыкновенных дифференциальных уравнений и анализу полученного решения. Задача решается в точной постановке, т. е. с учетом движения пластических шарниров.

Задача оптимизации формулируется следующим образом. Задана нагрузка, граничные условия и объем конструкции. Надо найти такую форму конструкции, при которой наибольший остаточный прогиб минимален. Учитывая разновидность возможных пластических режимов, задачу оптимизации можно решать лишь численно (методами нелинейного программирования).

Представляются результаты примерных задач, решенных при помощи составленного пакета.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПРЕДЕЛА ТЕКУЧЕСТИ НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПЛАСТИНЫ ПРИ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИИ

Лихачёв В.А., Мозгунов В.Ф.

Настоящая работа посвящена теоретическому анализу упруго-пластического поведения бесконечной пластины, боковые поверхности которой испытывают синхронное периодическое температурное воздействие. Материал пластины считается однородным, изотропным, упруго-пластическим с линейным упрочнением и является циклически стабильным. Все физико-механические константы, за исключением предела, текучести приняты постоянными. Предел текучести линейно зависит от температуры. Исследовано влияние термоциклов двух видов: первый включает в себя фазы быстрого нагрева (350 гр./сек) и медленного охлаждения (35 гр./сек), которые чередуются равными выдержками при достигнутой температуре до полного ее выравнивания по толщине пластины ($H = 0,04$ м); второй вид имеет фазы быстрого охлаждения и медленного нагрева.

Задача решена приближенным методом на ЭВМ. В ее основе лежит предположение о представлении процессов активного нагружения при различных температурах взаимоднозначной поверхностью в пространстве $\{\sigma, \epsilon, T\}$.

На рис. 1 отражена связь величины необратимого формоизменения ϵ_{ϕ} с параметром температурной зависимости предела текучести χ :

$$\chi = \frac{\sigma_s(T_{max}) - \sigma_s(T_{min})}{\sigma_s^*},$$

где $\sigma_s^* = \max(\sigma_s(T_{max}), \sigma_s(T_{min}))$ (300 МПа), T_{max} и T_{min} - пределы термоциклирования (0°C, 700°C). Термоциклом с быстрым нагревом отвечают кривые 1, 2; с быстрым охлаждением - 3, 4.

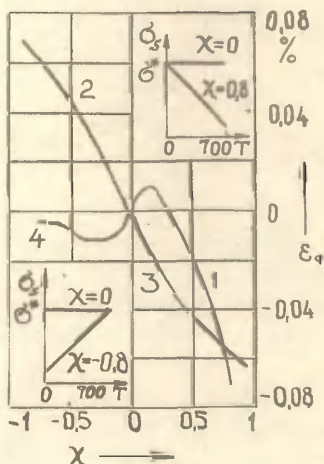


Рис. 1

Для процессов формоизменения, отвечающих области $\chi < 2$ и кривым 2, 3 в целом, перекрытие толщины пластины зонами пластической деформации происходит после фазы быстрого изменения температуры в процессе ее выравнивания по толщине. Смена знака ϵ_ϕ и напряжений при переходе с кривой 1 на 3 и с кривой 2 на 4 согласуется в данной области со сменой знака нагружения. Для оставшейся группы явлений, соответствующей кривым 1, 4 при $\chi \geq 2$, общим является тенденция к перекрытию зон пластического деформирования уже во время фазы быстрого изменения температуры.

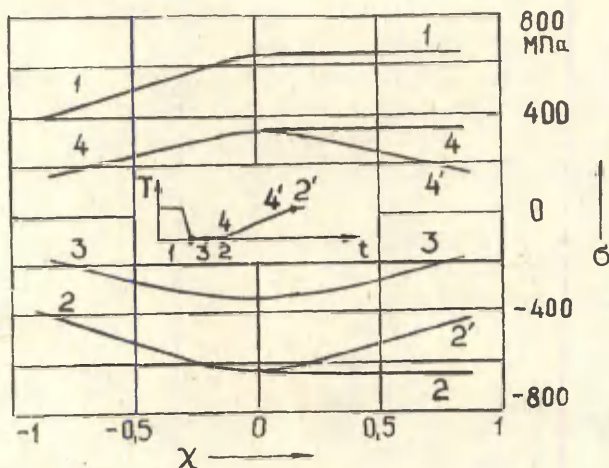


Рис. 2

На рис. 2 приведен пример зависимости максимальных и минимальных значений напряжений от параметра χ для термоцикла с фазой быстрого нагрева. Кривые 1, 2 отвечают размахам напряжений на поверхности, а 3 и 4 – в центре пластины. Характерной для данной задачи является возможность развития пластической деформации на фоне убывания абсолютной величины напряжений. Это подтверждается тем, что моменты достижения экстремумов величин σ и $\sigma/\sigma_s(T)$ не всегда совпадают, кривая 2' – σ при $\min(\sigma/\sigma_s(T))$ на поверхности, а 4' – σ при $\max(\sigma/\sigma_s(T))$ в центре пластины.

К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ ИСХОДНОЙ ДИСЛОКАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ НА СКОРОСТНУЮ ЗАВИСИМОСТЬ НАПРЯЖЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ

Лукерченко В. Н.

Известно, что если вести деформацию при двух разных скоростях деформирования $\dot{\epsilon}_1$ и $\dot{\epsilon}_2$, то для достижения одной и той же степени деформации требуется разная величина приложенного напряжения. Разница в напряжении может быть связана прежде всего с особенностями формирования дислокационной структуры кристалла в процессе деформации. Эти структурные изменения, происходящие при пластической деформации, необратимы в случае снятия приложенного напряжения.

Пусть вначале деформация происходит при скорости деформирования $\dot{\epsilon}_1$, а сразу после достижения предела текучести скорость деформации резко увеличивается до $\dot{\epsilon}_2$ (при сохранении постоянной температуры). При этом кривая деформации почти совпадает с кривой деформирования с неизменной скоростью деформирования $\dot{\epsilon}_2 = \text{const}$. В случае, когда переход от $\dot{\epsilon}_1$ к $\dot{\epsilon}_2$ происходит на стадии развитого пластического течения, кривая деформации будет заметно отличаться от кривой деформирования с постоянной скоростью деформирования $\dot{\epsilon}_2 = \text{const}$. Таким образом, скоростная зависимость напряжения пластического течения на стадии развитой деформации становится слабее [1].

На примере деформирования монокристаллов с ГЦК и ГПУ структурой на стадии одиночного скольжения указанные экспериментальные факты находят соответствующее теоретическое объяснение [2]. Показано также, что исходная дислокационная структура материала играет определяющую роль в скоростной зависимости напряжения пластического течения кристалла. На указанном примере обсуждается справедливость отношения Коттрелла-Стокса [3].

1. Чучман Т. Н., Лихачев В. А. Механизмы деформационного упрочнения и температурно-скоростной зависимости напряжения течения., Л., 1972, Препринт 412, Физтех АН СССР.
2. Лукерченко В. Н. К теории деформационного упрочнения кристаллических материалов. - Физика и химия обработки материалов, 1983, № 4, стр. 105-112.
3. Cottrell A. N., Stokes I. R. - Proc. Roy. Soc., 1955, A, v. 233, N 1192, p. 17-21.

УЧЕТ ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БЕТОНОВ НА РАННЕЙ СТАДИИ

ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МАССИВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Макагонов В.А., Полянский М.М., Эсаулов С.Л.

Учет пластических свойств бетонов при проектировании массивных монолитных бетонных и железобетонных конструкций, особенно на ранней стадии, является одним из важных вопросов, связанных с предотвращением процесса трещинообразования в период твердения бетонной смеси.

Пластические свойства бетонов в начальный период формирования массивных монолитных бетонных и железобетонных конструкций могут положительно сказываться на их напряженно-деформированном состоянии. Бетоны раннего возраста обладают высокой пластичностью, что может приводить к значительному снижению уровня напряжений, вызванных температурными и усадочными деформациями, а также к выгодному перераспределению напряжений внутри массивных монолитных бетонных и железобетонных конструкций.

Учет пластических свойств бетонов на ранней стадии при проектировании массивных монолитных бетонных конструкций позволяет улучшить их эксплуатационные характеристики и в первую очередь долговечность. Эти свойства молодых бетонов требует дальнейшего детального изучения и внедрения в практику строительства.

Бетоны обладают свойством старения, то есть изменяют во времени свои основные физико-механические характеристики: прочность, модули упругих продольных деформаций и сдвига, меру ползучести и другие.

Одним из важных пластических свойств, присущих бетонам на ранней стадии, является ползучесть. Ползучесть и связанная с ней способность к релаксации напряжений являются такими характеристиками бетонов, которые необходимо учитывать при расчете напряженно-деформированного состояния массивных монолитных конструкций на ранней стадии их возведения.

Практической реализацией результатов исследований пол-

зучести бетонов является разработка способов расчета бетонных конструкций с учетом изменения его физико-механических свойств в период твердения.

В настоящее время существует ряд предложений, позволяющих учитывать пластические свойства бетонов при проектировании сооружений. К ним относятся разработки ЦНИИС Минтрансстроя СССР, Одесского инженерно-строительного института, а также Рекомендации ЕКБ-ФИП.

Недостатком существующих предложений является применение большого количества /до одиннадцати/ корректирующих коэффициентов, которые достаточно сложно учесть в реальных условиях строительного производства.

Авторы предлагают для получения достоверной информации о пластических свойствах бетонов использовать меньшее количество факторов, но более стабильных и значимых для строительной практики. Это начальный модуль деформации и возраст бетона, которые легко установить при строительстве сооружений.

На основании анализа имеющихся в литературе исследований по ползучести бетона, а также теоретических и экспериментальных разработок авторов получена эмпирическая зависимость для расчета коэффициентов релаксации напряжений в бетоне при стационарных вынужденных деформациях

$$H(t, \tau_1) = 1 - \left(1 - \frac{1}{C_{нЕК_t}}\right) \left\{1 - \exp\left[-\frac{0,04}{C_{нЕК_t}}(t - \tau_1)\right]\right\},$$

где C_n — нормативная мера ползучести;

E — начальный модуль деформации бетона;

K_t — коэффициент, учитывающий возраст бетона;

t — возраст бетона в момент наблюдения;

τ_1 — возраст бетона в момент начала формирования напряжений.

Полученная зависимость позволяет легко определять коэффициенты релаксации напряжений с учетом реального изменения пластических свойств бетонов на ранней стадии, что приводит к повышению качества массивных монолитных бетонных и железобетонных конструкций.

УЧЕТ ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БЕТОНА В КОНСТРУКЦИЯХ ПРИ СЛОЖНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

Макагонов В.А., Цветков С.В.

Бетон, являясь основным компонентом большого числа конструкций, в значительной мере определяет многие их свойства. К наиболее важным из них следует отнести пластичность. Основной характеристикой пластических свойств бетона является значение предельной деформации, включающее в себя упругую, пластическую и псевдопластическую составляющие. В свою очередь, пластические свойства определяются напряженным состоянием.

Рассматривать вопрос о пластичности следует неразрывно с вопросом о прочности бетона. Со значением прочности в конечном итоге связано значение составляющих предельной деформации. В настоящее время существует большое количество часто противоречивых данных о прочности бетона в различных напряженных состояниях. Так, при двухосном сжатии одни исследователи не обнаружили изменения прочности бетона, другие отметили повышение прочности по сравнению с одноосным сжатием в 1,5–2,0 раза. Данных об изменении деформативных свойств в работах не приводится.

Для этого частного случая сложного напряженного состояния предлагается следующая модель разрушения.

Представим сечение образца в виде плоской квадратной решетки, каждый узел которой характеризуется определенным значением прочности. При действии на образец нагрузки соответствующей величины часть узлов «разрушается» или «выключается». Местоположение в решетке «выключенных» узлов является случайным. Будем считать, что разрушение образца происходит тогда, когда появляется группа «выключенных», связанных между собой узлов, пересекающая решетку в любом направлении.

При приложении к образцу бокового давления происходит изменение характера разрушения. Из экспериментов известно, что разрушение образца в этом случае происходит по поверхностям, параллельным направлению действия боковых сжимающих

напряжений. Следовательно, можно предполагать наличие строго ориентированного направления разрушения узлов. Задачи такого типа относятся к задачам теории протекания. Теория протекания описывает критические явления. Эти явления характеризуются некоторой критической точкой или границей, при переходе через которую определенные свойства исследуемой системы резко меняются. К таким процессам можно отнести и разрушение. Первая из задач относится к случаю неориентированного, а вторая – к случаю ориентированного протекания. Теоретический анализ предложенной модели позволил получить зависимость вида:

$$R^* = R \left[1 + 0,20(n-1) \left(1 - \frac{1}{1 + \sigma_2/R} \right) \right],$$

- где R^* – прочность бетона при двухосном сжатии с учетом всех составляющих предельной деформации;
 R – прочность бетона при одноосном сжатии;
 σ_2/R – уровень бокового обжатия;
 n – параметр хрупкости, определяемый отношением полной величины предельной деформации к ее упругой составляющей.

Полученная зависимость проверена авторами экспериментально. Испытания проводились статической нагрузкой, боковое давление прикладывалось пассивно. Выполненный статистический анализ адекватности результатов теоретических и экспериментальных исследований показал их хорошее совпадение по критерию Фишера.

Следует отметить, что при наличии бокового обжатия происходит значительное изменение пластических свойств бетона, обусловленное в основном значительным, в 1,5–2,5 раза, ростом псевдопластической составляющей предельной деформации. Увеличение псевдопластической составляющей приводит к тому, что зависимость между напряжениями и деформациями при двухосном сжатии отличается от аналогичной зависимости в случае одноосного сжатия.

Полученные результаты позволяют уточнить расчетную модель бетона для расчета железобетонных конструкций.

СТРУКТУРНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СРЕДЫ, ОСНОВАННАЯ НА ТРАНСЛЯЦИОННО-РОТАЦИОННОМ МАССОПЕРЕНОСЕ С УЧЕТОМ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ МАСШТАБНЫХ УРОВНЕЙ

Малинин В.Г.

Реальные конструкции и их элементы часто работают в сложных реологических условиях при непропорциональных режимах нагружения. В названных ситуациях, как правило, разрушению предшествуют значительные структурные изменения материала. Для адекватного прогнозирования процессов деформации и разрушения необходим рациональный синтез возможностей механики и основных достижений физики прочности и пластичности.

В настоящем сообщении предлагается один из подходов решения названной задачи с помощью представлений структурно-аналитической механики материалов. При формулировке модели принято:

1. остаточная деформация осуществляется механизмами трансляционно-ротационного движения структурных элементов деформации и разрыхлением материала. Введены математические меры, характеризующие потоки скольжений, ротации и разрыхления на соответствующих структурных уровнях;

2. деформация происходит одновременно на нескольких взаимодействующих масштабных уровнях: трансляция на одном уровне сопровождается поворотом на более высоком структурном уровне и наоборот. Выведены кинетические уравнения, учитывающие взаимодействие масштабных уровней, эволюцию структурного состояния вещества и массоперенос на каждом уровне;

3. нестационарные температурно-скоростные режимы деформирования порождают сложные процессы локализации и релаксации микронапряжений, оказывающие существенное влияние на зарождение и развитие пластического течения на всех масштабных уровнях. Введены соответствующие математические меры.

На основе указанных представлений единими аналитическими зависимостями описаны механические свойства кристаллических материалов при различных нестационарных режимах в условиях простого, а также непропорционального нагружения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ СТАЛИ ПОД ВЫСОКИМ ГИДРОСТАТИЧЕСКИМ ДАВЛЕНИЕМ

Малинин В.Г., Овчаренко С.Я., Мартухин Г.А.

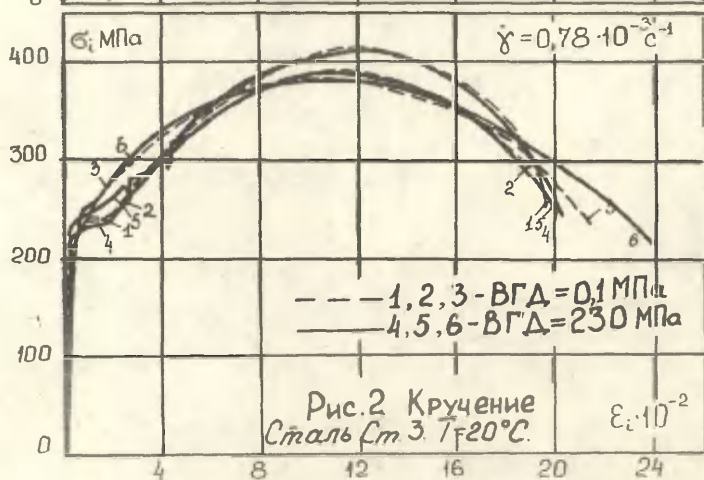
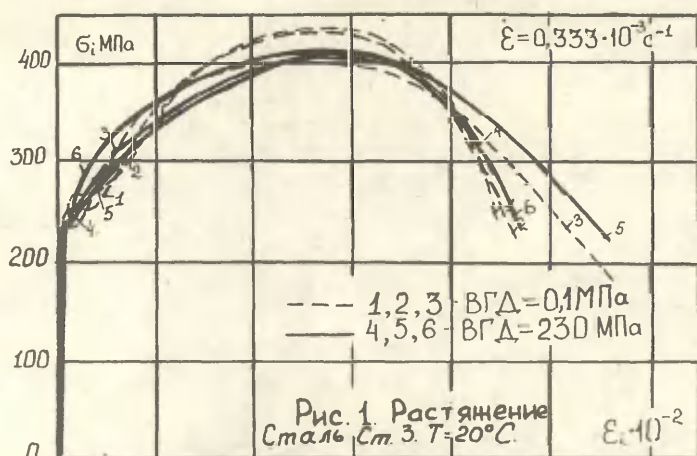
Представлены результаты опытов по исследованию временных эффектов при пластической деформации стали Ст.3 в условиях обычных и высоких гидростатических давлений (до 230 МПа). Испытывались тонкостенные трубчатые образцы по программам с выдержками материала во времени при постоянных фиксированных напряжениях. Исследовалось влияние выдержки материала под нагрузкой в интервале 5÷30 мин. как в макроупругой области (т.е. при напряжениях, меньших предела текучести), так и в пластической. Опыты проводились в условиях чистого растяжения, чистого кручения, а также при двухзвенных траекториях нагружения.

В условиях сложного напряженного состояния исследовалось влияние 20-ти минутной выдержки с момента окончания нагружения по первому звену до начала нагружения по второму на характер пластической деформации в окрестности резкого излома траектории нагружения. Выявлена сложная зависимость модуля пластичности от реологического режима нагружения, степени предварительной пластической деформации и величины гидростатического давления.

Опыты при чистом растяжении и кручении показали существенное влияние выдержек материала под нагрузкой на величину и характер площадки текучести. По мере увеличения степени предварительного нагружения площадка текучести уменьшалась и при напряжениях, близких к пределу текучести, исчезала. Отметим, что величина площадки текучести при кручении существенно больше, чем при растяжении. Сравнение проводилось в обобщенных координатах $\bar{\sigma}$ - $\bar{\epsilon}$.

Гидростатическое давление значительно изменяло величину и наклон площадки текучести и увеличивало предельную пластичность. Выдержка во времени при различном напряжении за пределами текучести способствовала появлению упругого участка на кривой деформации.

Полученные результаты обсуждались на основе представлений структурно-аналитической механики материалов.



На приведенных рисунках кривые 1, 4 характеризуют деформацию при $\dot{\epsilon}, \dot{\gamma} = \text{const}$; кривые 2 и 5, 3 и 6 отражают поведение материала по программированному режиму нагружения, содержащему предварительную выдержку во времени 30 мин. при постоянных фиксированных напряжениях (σ_k, τ_k):

2 - $\sigma_k = 1,3 \sigma_m, \tau_k = 1,4 \tau_m$; 5 - $\sigma_k = 1,16 \sigma_m, \tau_k = 1,2 \tau_m$.

3 - $\sigma_k = 0,73 \sigma_m, \tau_k = 0,83 \tau_m$; 6 - $\sigma_k = 0,76 \sigma_m, \tau_k = 0,92 \tau_m$.

ДЕФОРМИРУЕМОСТЬ ПРОСТРАНСТВЕННО АРМИРОВАННОГО КОМПОЗИТА С УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНО УПРОЧНЯЮЩЕЙСЯ МАТРИЦЕЙ

Мельбардис Д.Г.

Приведены результаты численного исследования нелинейных деформативных свойств композитов системы бор-алюминиевый сплав, произвольно пространственно армированных прямыми волокнами. Особое внимание уделено нелинейному деформированию однонаправленного композита, состоящего из тех же структурных компонентов, что и рассматриваемые пространственно армированные материалы, поскольку основным элементом анализа схем армирования последних является однонаправленно армированных расчетный структурный элемент. Предложена структурная расчетная модель деформирования такого однонаправленного элемента, в которой нелинейные свойства элемента и матрицы представлены степенным рядом по напряжениям при помощи упругих потенциалов специального вида.

При решении некоторых задач механики композитов необходимо иметь аналитические зависимости между деформациями и напряжениями в двух разных формах: $\epsilon = \epsilon(\sigma)$ и $\sigma = \sigma(\epsilon)$, что, например, позволяет установить верхнюю и нижнюю оценки деформируемости композита. Однако получение указанных зависимостей сопряжено с определенными трудностями, особенно в области физической нелинейности.

Для решения упомянутой задачи предложена другая нелинейная модель (феноменологическая) деформирования однонаправленно армированного расчетного элемента со сравнительно небольшим числом исходных параметров. Нелинейная связь между деформациями и напряжениями установлена при помощи элементарных функций. Полученные зависимости подчиняются требованию аналитического обращения. Методом усреднения деформаций (или напряжений) в однонаправленных расчетных элементах материала численно посредством ЭВМ построены кривые деформирования на чистый сдвиг композитов (алюминиевый сплав, армированный волокнами бора) с семью различными схемами армирования, в том числе четырьмя пространственными. Каждая схема представлена двумя кривыми деформирования, являющимися верхней и нижней границами кривой деформация - напряжение.

ОБ ИЗМЕРЕНИИ НЕРАВНОВЕСНОЙ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ ПО СКОРОСТИ В УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

Мещеряков П.И., Диваков А.К.

С помощью интерферометрической методики проведено прямое измерение эволюции функции распределения частиц на свободной поверхности ударно-нагружаемых алюминиевых мишеней. Определение ширины функции распределения основано на измерении процента относительного снижения амплитуды бией интерференционного сигнала, т.е. ухудшения контраста интерференционной картины в том случае, если частицы свободной поверхности мишени движутся с различной скоростью. В этом случае из-за различия в величине доплеровских сдвигов частот лазерного излучения последнее после отражения от свободной поверхности теряет когерентность. Установлено, что для нестационарных пластических фронтов ширина функции распределения меняется вдоль пластического фронта, сужаясь к его середине и расширяясь к краям, в то время как для стационарных упруго-пластических волн функция распределения постоянна по ширине вдоль всего пластического фронта.

Имеется жесткая корреляция между зависимостью механических свойств материалов от скорости деформации и шириной функции распределения частиц по скоростям. Для материалов, не проявляющих скоростных эффектов, характерна большая дисперсия массовой скорости частиц на пластическом фронте, в то время как в материалах с сильно выраженными скоростными свойствами функция распределения стремится к дельта-образной форме.

С помощью экспериментов по откольному разрушению материалов установлена такая корреляция между ориентацией микропор на поперечных разрезах мишеней и шириной функции распределения частиц. В материалах с широкой функцией распределения микропоры вытянуты вдоль направления распространения волны, т.е. перпендикулярно свободной поверхности мишеней. Наоборот, в материалах с узкой функцией распределения частиц по скоростям микропоры ориентированы параллельно свободной поверхности.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Муравин Г.В., Лезвинская Л.М., Шаферман И.М., Ботвина Л.Р.

Рассмотрена возможность определения стадии пластического деформирования материалов методом АЭ, опыты выполнены на кремнистом железе, стали 14Х2ГМР и 15ХСНД.

Деформирование образцов осуществлялось с помощью импульсной электрогидродинамической установки и на машине "Инстрон".

Процесс пластического деформирования кремнистого железа, двойникование, регистрировался с помощью сверхскоростной киносъемки. Методом растровой электронной микроскопии выполнено исследование изменения микроструктуры сталей на отдельных этапах нагружения.

Параметры АЭ измерялись модифицированной системой АВН-3. Регистрировалась мощность излучения и выборка отдельных сигналов на разных ступенях нагружения. Проводился спектральный анализ импульсов.

В процессе деформирования кремнистого железа установлено отличие спектрального состава излучения при образовании полос скольжения, двойников и трещин. Обнаружено, что переход от стадии упругого деформирования к массовому пластическому течению и упрочнению сопровождается ростом активности АЭ и соответствующим изменением спектра импульсов. Сделан вывод о возможности практического использования выявленных закономерностей для идентификации стадии деформирования материала с параметрами АЭ.

О ВЛИЯНИИ СЕГРЕГАЦИИ ПРИМЕСЕЙ НА СВЕРХПЛАСТИЧНОСТЬ ТЕЧЕНИЯ

Набережных В.П., Фельдман Э.П., Дрченко В.М.

В поликристаллическом агрегате примеси, входящие в твердый раствор и находящиеся вблизи границ зерен, могут образовывать на границах равновесные сегрегации. Эти сегрегации могут существовать в форме твердого раствора повышенной концентрации либо выпадать как отдельные фазы. В любом случае образование сегрегаций приводит, как правило, к уменьшению сил сцепления между сопредельными зернами и, как следствие, к существенному возрастанию роли скольжения по границам зерен. Это означает, что явление сверхпластичности может в значительной мере определяться процессом сегрегации примесей на границах зерен.

Мы обращаем внимание на тот экспериментальный факт, что развитая сверхпластичность мелкозернистой структуры (~ 5 мкм) является немонотонной функцией температуры с четко выраженным максимумом при $0,4 \leq T < T_{нл}$ [1].

В соответствии с высказанным предположением о роли сегрегации пояснение этому факту можно дать, получив температурную зависимость степени сегрегации. Эта зависимость была получена нами ранее [2] на основе модели индуцированного упругого взаимодействия примесей с границами, и она повторяет качественно ход зависимости предельной концентрации примеси в твердом растворе от температуры. Максимальная степень обогащения границы примесями достигается при температуре, близкой к точке соответствующей максимуму растворимости по фазовой диаграмме, которая лежит в пределе $0,4 + 0,8 T_{нл}$.

Литература

1. Кайбышев О.А. «Пластичность и сверхпластичность металлов»; М., «Металлургия», 1975 г., 280 стр.
2. Набережных В.П., Фельдман Э.П., Дрченко В.М. «Влияние упругого взаимодействия точечных дефектов на их сегрегацию в межзеренных границах», ФТТ, т. 24, вып. 7, стр. 2057-2063, 1982.

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ НА АКУСТИЧЕСКУЮ ЭМИССИЮ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МОНОКРИСТАЛЛОВ АЛЮМИНИЯ

Надик В.Д., Бирик З.И., Андронов В.М., Берубенко В.В.

Исследована акустическая эмиссия (АЭ) образцов монокристаллического алюминия чистотой 99,9997% и 99,99% в процессе растяжения с постоянной скоростью $3 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ о ориентациями оси растяжения на легкое и множественное скольжения. Регистрация АЭ осуществлялась одновременно двумя типами датчиков: резонансные (с основной частотой 200 кГц) и широкополосным (с полосой 0,1–3 МГц). Во всех перечисленных случаях получена зависимость скорости счета АЭ \dot{N} от деформации ϵ и суммарного счета АЭ N от напряжения τ . Особенности акустической диаграммы $\dot{N}(\epsilon)$ сопоставлены с картинами развития следов скольжения, выявлявшихся металлографическим методом. Полученные результаты сравниваются с имеющимися литературными данными по монокристаллам алюминия.

Основные результаты:

I. Диаграммы $\dot{N}(\epsilon)$ для исследуемых образцов имеют два максимума при малых степенях деформации (см. рис. 1, 2).

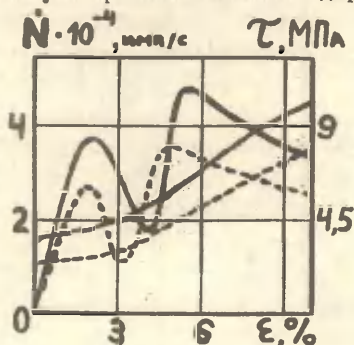


Рис. 1. Зависимости $\dot{N}(\epsilon)$ и $\tau(\epsilon)$ для монокристаллов, ориентированных на легкое скольжение (—) чистоты 99,99; (---) — чистоты 99,9997

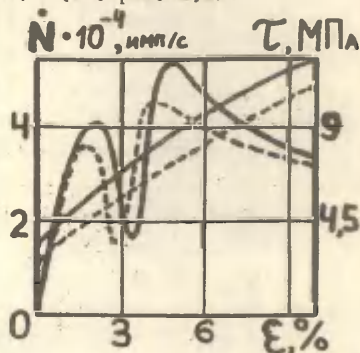


Рис. 2. Зависимость $\dot{N}(\epsilon)$ и $\tau(\epsilon)$ для монокристаллов, ориентированных на множественное скольжение (—) чистоты 99,99; (---) чистоты 99,9997.

2. С увеличением концентраций примесей высота максимумов увеличивается, а положение их смещается в сторону больших степеней деформации.

3. Зависимость суммарного счета $\Delta Z \dot{N}$ от величины сдвигового напряжения τ на начальной стадии деформационной кривой описывается эмпирической формулой вида

$$\dot{N}(\tau) = k(\tau - \tau_0)^2.$$

Коэффициент k и акустический предел текучести τ_0 зависят как от чистоты, так и от ориентации кристаллов.

4. Металлография показывает, что для монокристаллов, ориентированных на легкое скольжение до деформации, соответствующей минимуму скорости счета $\Delta Z \dot{N}$, наблюдаются прямолинейные следы скольжения. В этой же области деформации появляются следы скольжения во вторичной системе скольжения, которые при дальнейшем увеличении деформации размножаются. При деформации, соответствующей второму максимуму скорости счета, линии скольжения покрывают почти всю поверхность рабочей части образца. При дальнейшем деформировании линии скольжения как первичной, так и вторичной систем упрявляются и количество их увеличивается.

Для монокристаллов, ориентированных на множественное скольжение до деформации $\varepsilon \sim 0,8\%$, наблюдаются также те прямолинейные следы скольжения, что и для монокристаллов, ориентированных на легкое скольжение, и еще до первого максимума $\dot{N}(\varepsilon)$ при увеличении от $0,8\%$ до 1% появляются первые линии вторичной системы скольжения, которые уже хорошо видны в области первого максимума при $1,7\%$. В области второго максимума $\dot{N}(\varepsilon)$ при $\varepsilon \sim 4\%$ линии скольжения вторичной системы покрывают всю поверхность рабочей части образца, но с большей плотностью, чем в случае легкого скольжения. Дальнейшая эволюция линий скольжения в данном случае не отличается от случая монокристаллов, ориентированных на легкое скольжение.

5. Электронно-микроскопические исследования показали, что правые максимумы скорости счета $\Delta Z \dot{N}$ соответствуют группировке дислокаций в редкие сплетения и клубки. Спад скорости счета ΔZ сопровождается образованием ячеистой структуры, которую при образовании нейки можно назвать и субзеренной, но нерегулярными, весьма сложными границами дислокаций.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ХАРАКТЕРИСТИК К РАСЧЕТУ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ РАМ НА ДЕЙСТВИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

Некрасов В.В., Бабин В.В.

Рассматриваются вопросы применения метода характеристик к расчету металлических и железобетонных стержневых систем, работающих в области малых упруго-пластических деформаций.

Представим раму в виде системы отдельных стержней, в пределах которых геометрические характеристики сечений и физико-механические свойства материала постоянны. Упруго-пластические колебания металлического стержня можно описать системой дифференциальных уравнений, составленных на основе моделей П.Пэжина и С.П.Тимошенко. Она включает в себя уравнения движения

$$\frac{\partial \dot{\psi}}{\partial t} - \frac{1}{\rho I} \frac{\partial M}{\partial x} = -\frac{Q}{\rho I}, \quad \frac{\partial \dot{u}}{\partial t} - \frac{1}{\rho A} \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{q_x}{\rho A}, \quad \frac{\partial \dot{u}}{\partial t} - \frac{1}{\rho A} \frac{\partial N}{\partial x} = \frac{q_x}{\rho A} \quad (1)$$

и уравнения состояния

$$\frac{\partial M}{\partial t} - EI \frac{\partial \dot{\psi}}{\partial x} = P_1, \quad \frac{\partial Q}{\partial t} - \gamma GA \frac{\partial \dot{u}}{\partial x} = \gamma GA \dot{\psi} + P_2, \quad \frac{\partial N}{\partial t} - EA \frac{\partial \dot{u}}{\partial x} = P_3. \quad (2)$$

Здесь M, Q, N - внутренние усилия; $\dot{u}, \dot{\psi}$ - скорости смещений и углов поворота сечений; A, I - площадь и момент инерции поперечного сечения; ρ - плотность материала; E, G - модули продольной деформации и сдвига; γ - коэффициент неравномерности распределения касательных напряжений; q_x и q_y - интенсивности распределенных нормальных и касательных нагрузок;

P_1, P_2, P_3 - компоненты вектора пластичности

$$P_1 = EMR/3, \quad P_2 = GQR, \quad P_3 = ENR/3,$$

$$R = \frac{\sqrt{3} Q}{\sigma_0(F+1)} \langle \bar{\Phi}(F) \rangle, \quad F = \sqrt{\left(\frac{M}{M_0} + \frac{N}{N_0}\right)^2 + \left(\frac{Q}{Q_0}\right)^2} - 1, \quad \bar{\Phi}(F) = \begin{cases} \Phi(F), & F > 0 \\ 0, & F \leq 0 \end{cases};$$

Q - коэффициент вязкости материала; σ_0 - статический предел текучести; M_0, Q_0, N_0 - предельные значения внутренних усилий; функция $\bar{\Phi}(F)$ аппроксимирует экспериментальную кривую $\sigma(\epsilon)$.

В соответствии с теорией малых упруго-пластических деформаций уравнения состояния для железобетонных элементов имеют вид

$$\frac{\partial M}{\partial t} - B_n \frac{\partial \dot{\psi}}{\partial x} - C_n \frac{\partial \dot{u}}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial Q}{\partial t} - D_n \frac{\partial \dot{v}}{\partial x} = D_n \dot{\psi}, \quad \frac{\partial M}{\partial t} - B_n \frac{\partial \dot{u}}{\partial x} - C_n \frac{\partial \dot{v}}{\partial x} = 0. \quad (3)$$

Здесь $B_n = EI_n$, $C_n = ES_n$, $D_n = \sqrt{6}A_n$; I_n , A_n — приведенные значения момента инерции и площади поперечного сечения;

S_n — приведенное значение статического момента. Эти геометрические характеристики определяются относительно средней линии элемента.

В случае упругой работы металлических и железобетонных элементов уравнения (2) и (3) совпадают.

Область решения для каждого стержня разбивалась сеткой с постоянными шагами по координате x и времени t . Системы уравнений (1), (2) или (1), (3) представлялись сначала в характеристической форме и затем записывались в конечных разностях. Решение для крайних точек каждого стержня находилось из рассмотрения уравнений движения узлов рамы с учетом закрепления некоторых из них на опорах. Этот алгоритм реализован в виде программы, написанной на языке ПЛ/I.

Сравнение результатов расчета металлических упруго-идеально пластических балок методом характеристик с известными аналитическими решениями И.И.Диковича показало хорошую сходимость (от 4 до 10 %). Результаты численных расчетов перемещений железобетонной балки совпали с точностью до 15-18 % с экспериментом. В начальный период расхождения несколько больше из-за неучета наличия микротрещин.

ОБЪЕМ ПЛАСТИЧНОСТИ АМОРФНЫХ ЛЕНТ СПЛАВА $\text{Fe}_{50}\text{Co}_{20}\text{Si}_{15}\text{V}_{10}$ В УСЛОВИЯХ ПРОКАТКИ И РАСТЯЖЕНИЯ

Насонова Н.Н., Вильданова П.Ф., Потапов А.П.

Ленты аморфного сплава $\text{Fe}_{50}\text{Co}_{20}\text{Si}_{15}\text{V}_{10}$ деформировались путем одностороннего растяжения и прокаткой при температурах 293, 373, 473 и 573 К. Скорость растяжения была $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ сек}^{-1}$. Скорость прокатки составляла 0,5% деформации за один проход.

Пластические (деформационные) полосы сдвига, возникающие на поверхности деформированных лент сплава, изучались с помощью световой оптической и электронной просвечивающей микроскопии. Использовался также электронный растровый микроскоп.

При растяжении до разрыва аморфные ленты обнаружили следующие пластические свойства:

при 293 К -	относительное удлинение	0%,
373 К -	" "	0%,
473 К -	" "	1,5%,
573 К -	" "	1,2%.

Известно, что при прокатке аморфные сплавы деформируются на большую степень деформации. Так, исследуемый сплав можно прокатать при 293 К до появления первой макротрещины на 17% (по относительному удлинению).

Относительно высокая пластичность аморфных лент сплава при деформации прокаткой является, по-видимому, следствием разной схемы напряженного состояния, реализуемой при растяжении и прокатке. Это прежде всего проявляется в характере распределения сдвиговых (деформационных) полос.

При растяжении сдвиговые полосы обнаруживаются в достаточно малой области деформируемых лент (в месте разрыва). Наблюдается сильная локализация сдвиговых полос с большой величиной ступеньки, что косвенно указывает на то, что в сдвиговой полосе идут процессы разупрочнения материала, позволяющие продолжаться деформации в ней до разрушения.

Эволюция сдвиговых полос при прокатке резко отличается от эволюции сдвиговых полос в аморфном сплаве при деформации растяжением. Прежде всего начало деформации при прокатке происходит, вероятнее всего, на неровностях аморфной ленты. Возникающий избыточный объем передается в виде сдвиговых полос по поверхности

и углубь материала. На начальных стадиях прокатки, в связи с вышесказанным, распределение сдвиговых полос очень неравномерно и сдвиговые уступы характеризуются малой величиной ступеньки. По мере увеличения деформации плотность сдвиговых полос возрастает и, в отличие от деформации растяжения, происходит делокализация полос. Можно поэтому предполагать, что при прокатке процессы разупрочнения в сдвиговых полосах не идут либо затруднены, и продолжение деформации осуществляется распространением деформационного сдвига как по имеющейся уже деформационной полосе, так и в соседней с ней области. С дальнейшим увеличением степени деформации наблюдается несколько систем деформационных полос, в местах пересечения которых возникают трещины.

Поведение, изменение характера и распределения сдвиговых полос с увеличением степени деформации при прокатке аморфного сплава имеет много общего с картиной развития следов скольжения на нелинейном участке кривой упрочнения монокристаллов малоуглеродистого α -железа. Известно, что характер и распределение следов скольжения на этой стадии упрочнения в α -железе определяются активизацией некристаллографического скольжения.

Поскольку в местах пересечения деформационных полос возникает сильная локализация деформационных сдвигов, то есть избыточный объем, по-видимому, можно считать справедливым имеющееся в литературе представление, требующее необходимых условий для образования трещины в виде одновременного наличия избыточного объема и действия значительного растягивающего напряжения.

Принято считать, что аморфные материалы при деформации испытывают незначительное упрочнение. Как показали измерения микротвердости в деформированных на разные степени аморфных лентах, это не совсем так. В данном случае на сплаве $\text{Fe}_{50}\text{Co}_{70}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$ величина микротвердости изменяется после деформации прокаткой на 40%.

Итак, пластичность аморфных лент сплава $\text{Fe}_{50}\text{Co}_{70}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$ в условиях деформации прокаткой обусловлена, вероятно, рядом факторов: особенностями распространения сдвиговых полос, отсутствием процессов разупрочнения в сдвиговых (деформационных) полосах, особенностями зарождения и развития трещин.

ПЛАСТИЧНОСТЬ В ТЕЛАХ С ДИСЛОКАЦИОННЫМИ И ДИСКЛИНАЦИОННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ (КАЛИБРОВОЧНАЯ ТЕОРИЯ)

Овдзько И.А., Романов А.Е.

В последние годы в теории дефектов - носителей пластической деформации твердых тел - получили развитие калибровочный подход и связанный с ним метод внешних форм [1]. В настоящем сообщении с помощью этого подхода исследуются уравнения динамики дефектов в присутствии дислокационных и дисклинационных источников, а также обобщение калибровочной теории дефектов на анизотропный случай. Общий вид уравнений динамики дефектов [1]:

$$\partial_t \alpha^i = -d J^i - S^i; \quad i = 1, 2, 3; \quad (1)$$

$$\partial_t \theta^i = -d S^i; \quad d \alpha^i = \theta^i; \quad d \theta^i = 0, \quad (2)$$

где α^i - 2-формы дислокационной плотности, J^i - 1-формы дислокационного потока, θ^i - 3-формы дисклинационной плотности, S^i - 2-формы дисклинационного потока, d - знак внешнего дифференцирования.

Учет наличия дислокационных источников типа Франка-Рида приводит к следующей модификации уравнения (1):

$$\partial_t \alpha^i = -d J^i - S^i - \alpha^i (d P^i), \quad (3)$$

где P^i - 1-формы дислокационной поляризации, описывающие источники и удовлетворяющие условию $P^i|_B = 0$ на границе тела B . Если в материале присутствуют также источники дисклинаций, характеризующиеся 2-формами плотности источников D^i ($D^i|_B = 0$), то необходимо произвести следующее изменение уравнений (2):

$$\partial_t \theta^i = -d S^i + \alpha^i (d D^i); \quad \theta^i = d \alpha^i + d D^i; \quad d \theta^i = 0. \quad (4)$$

Теория дефектов изотропного тела обладает симметрией $SO(3) * T(3)$ - полупрямого произведения группы вращений $SO(3)$ и группы трансляций $T(3)$ [1]. Обобщением подхода на анизотропный случай является подходящее частичное нарушение калибровочной группы. Рассмотренное в данной работе обобщение калибровочной теории дефектов позволяет описывать закономерности поведения пластически деформируемых тел, содержащих ансамбли сильно взаимодействующих дефектов с заданной степенью точности.

1. Kadić A., Edelen D.G.B. A gauge theory of dislocations and disclinations. Lect. Not Phys., v.174, Springer, 1983, 290 p.

УНИВЕРСАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СЛОЖНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ И РАЗЛИЧНЫХ СКОРОСТЯХ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Овчаренко С.Я., Малинин В.Г.

Разработанная установка позволяет вести испытания на растяжение, сжатие и знакопеременное кручение при различных скоростях деформирования. В сменных испытательных камерах можно создать внутреннее давление в трубчатом образце, внешнее гидростатическое давление до 800 МПа, а также температуру до 1000°C. Основные узлы установки смонтированы на неподвижной траверсе испытательной машины УМЗ-10ТМ. Осевое растяжение-сжатие обеспечивается от привода УМЗ-10ТМ, коробка передач которой позволяет изменить скорость деформирования от 0,005 до 100 мм/мин. Закручивание образца в интервале скоростей 0,004-90 об/мин производится автономным приводом, содержащим реверсивный двигатель и коробку скоростей.

Прикладываемые к образцу силовые воздействия: осевое усилие, крутящий момент, внутреннее и внешнее давление измеряются с помощью тензометрической ячейки нагружения непосредственно в испытательной камере. Замер осевой, радиальной деформации и угла закручивания образца производится электромеханическими тензометрами, закрепленными непосредственно на образце. Непрерывная регистрация силовых и деформационных параметров в процессе испытания осуществляется стандартными самопишущими приборами.

Установка позволяет исследовать влияние первого инварианта тензора напряжений, третьего инварианта девиатора напряжений (параметра Лоде), истории и скорости нагружения на кривые пластического деформирования, прочность, пластичность и малоцикловую усталость конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии.

Разработаны методики испытания при нестационарных режимах деформирования. Проведены экспериментальные исследования при сложном напряженном состоянии в условиях высокого гидростатического давления. Результаты, полученные в этих экспериментах, согласуются с имеющимися в литературе.

ПРИНЦИПЫ ТЕРМОДИНАМИКИ В ТЕОРИИ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ УРАВНЕНИЙ

Пальмов В. А.

В современной механике деформируемых тел при общетеоретических рассуждениях и, в частности, в теории определяющих уравнений активно используются законы термодинамики и так называемый "принцип материальной независимости от системы отсчета".

В докладе представлена термодинамическая формулировка "принципа материальной независимости от системы отсчета". Она дается с использованием скалярных термодинамических величин: свободной - энергии, внутренней энтропии, функции диссипации, производства энтропии. С ее помощью доказывается традиционная формулировка принципа в напряжениях и тепловых потоках. Упомянутся классические определяющие уравнения нелинейной механики деформируемых тел. Они удовлетворяют второму закону термодинамики и "принципу материальной независимости от системы отсчета". Формулируется обобщение метода реологических моделей, позволяющее получать новые определяющие уравнения путем комбинации классических и доказывается, что новые уравнения удовлетворяют второму закону термодинамики и ограничениям принципа материальной независимости от системы отсчета. Обобщенная формулировка свободна от предположения о том, что объемная деформация является упругой и от предположения о том, что теплопроводность описывается законом Фурье.

Представлены примеры определяющих уравнений упруго-пластических материалов при конечных деформациях. Рассмотрены случаи изотропного, кинематического и комбинированного упрочнений.

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ

Панин В.Е., Гриняев Д.В.

При описании деформации необходимо использовать систему координат, жестко связанную с телом, и систему координат наблюдателя. Пусть в начальный момент эти системы совпадают и их метрический тензор δ_{ij} . В результате деформации система координат, связанная с телом, становится криволинейной, но тело остается куском евклидова пространства в системе наблюдателя. В конечном положении метрический тензор связанной системы равен g_{ij} и зависит от координат точек тела. Тензор деформации выражается как

$$e_{ij} = g_{ij} - \delta_{ij}. \quad (1)$$

В теории упругости доказывается, что при отсутствии внутренних источников напряжений тензор несовместности равен

$$\eta = \nabla \times e \times \nabla. \quad (2)$$

При наличии дефектов (внутренних источников напряжений), распределение которых характеризуется тензором $\eta(x)$, соотношение (2) можно рассматривать как уравнение относительно деформаций $e_{ij}(x)$, создаваемых дефектами. Из (1) можно в данном случае определить метрический тензор, по которому можно построить тензор Римана R_{ij} . Неравенство тензора Римана нулю говорит о том, что тело в конечном состоянии не является евклидовым. Легко показать, что тензор Римана R_{ij} и тензор несовместности совпадают. Таким образом, несогласованное распределение дефектов на различных структурных уровнях приводит к тому, что уравнение сплошности (2) не выполняется, что можно трактовать как возникновение несплошности в теле, то есть разрушение.

Рассмотрим один структурный уровень, который характерен для монокристалла на начальной стадии деформации. В этом случае деформация происходит за счет движения дислокаций, и тензор несовместности имеет вид

$$\eta = \nabla \times e \times \nabla = \nabla \times \left\{ \frac{1}{2} (Sp \alpha) \right\} - \alpha^*. \quad (3)$$

Условие сохранения сплошности при наличии дислокаций есть

$$\nabla \times \left\{ \frac{1}{2} (Sp \alpha) \right\} - \alpha^* = 0, \quad (4)$$

то есть выполняется при определенном условии, налагаемом на тензор плотности дислокаций α . Из (4) вытекает

$$\nabla \cdot \alpha = 0, \quad (5)$$

что источники и стоки отсутствуют внутри тела, а движение дислокаций носит безвихревой характер. Таким образом, (5) есть следствие сохранения сплошности тела. Возникновение вихрей плотности дислокаций приводит к нарушению сплошности.

При наличии двух уровней - дислокационного и дисклинационного - тензор несовместности примет вид

$$\eta = \nabla \times e \times \nabla = \nabla \times \left\{ \frac{1}{2} (Sp \alpha) I - \alpha^* \right\} - \theta.$$

Сохранение сплошности тела приводит к тому, что дефекты должны быть сбалансированы и удовлетворять соотношению

$$\nabla \times \left\{ \frac{1}{2} (Sp \alpha) I - \alpha^* \right\} - \theta = 0. \quad (6)$$

Из этого соотношения легко получить хорошо известное выражение теории дисклинаций

$$\left. \begin{aligned} \nabla \cdot \theta &= 0 \\ \nabla \cdot \alpha - \langle \theta \rangle &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Следовательно, соотношения (7) являются следствием сохранения сплошности (то есть тело остается куском евклидова пространства). Тогда невыполнение (7) (то есть дефекты на структурных уровнях несбалансированы) есть условие начала разрушения. Геометрически это значит, что геометрия тела становится неевклидовой. Разрушение будет происходить на структурном уровне, где согласно (7) не выполняется соответствующее соотношение. Следует отметить, что согласно (6) трансляция носит вихревой характер.

ФИЗИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНЫЙ РАСЧЕТ КОРОБЧАТЫХ СИСТЕМ МЕТОДОМ СУПЕРЭЛЕМЕНТОВ В ФОРМЕ МЕТОДА СИЛ

Плетнев В.И., Овсий В.М.

Суперэлементный расчет коробчатых систем в форме метода сил обладает определенными преимуществами перед традиционной формой метода суперэлементов [1]. Во-первых, это возможность учесть на линиях контакта пластин-суперэлементов только основные контактные усилия, что практически на снижает точности решения (например, на линии контакта плиты и стены обычно достаточно учесть одно сдвигающее усилие). Во-вторых, меньшая трудоемкость получения матриц податливости суперэлементов относительно линий контакта по сравнению с трудоемкостью получения матриц жесткости. Все это примерно на порядок снижает трудоемкость расчета коробчатых систем по сравнению с методом перемещений. Это обстоятельство приобретает особое значение при решении физически нелинейных задач.

Рассматривается коробчатая система типа многоэтажного крупнопанельного здания. Несущие плоскости ее, ослабленные отверстиями и швами, испытывают лишь плоское напряженное состояние. Предполагается, что неупругое поведение конструкции определяется деформациями сдвига по некоторому числу вертикальных и горизонтальных линий, совпадающих с рядами ослабляющих отверстий и монтажными швами, для которых задается нелинейная зависимость $T_{42} = T_{42}(\epsilon_{42})$.

Используется метод переменных жесткостей, причем реализован тот случай, когда нелинейная сдвиговая деформация швов имеет характер хрупкого разрушения [2]. Приводятся результаты расчета зданий на горизонтальные и вертикальные нагрузки.

Обсуждается возможность сокращения объема вычислений путем использования метода упругих решений, который позволяет вместо пересчета на каждом шаге глобальной матрицы метода сил производить ее корректировку за счет дополнительных перемещений суперэлементов, загруженных псевдосилами предыдущего шага.

1. Плетнев В.И. Расчет коробчатых систем методом сил и методом перемещений в сочетании с методом конечных элементов. - В кн.: Строительная механика сооружений: Межвуз. темат. сб. тр. Л.: ЛИСИ, 1983, с. 26-32.

2. Плетнев В.И., Овсий В.М. Расчет крупнопанельных зданий за пределом упругости. - В кн.: Расчет строительных конструкций...: Межвуз. темат. сб. тр. Л.: ЛИСИ, 1984, с. 59-62.

ВОПРОСЫ КОНЦЕПЦИИ СКОЛЬЖЕНИЯ В ТЕОРИИ ПЛАСТИЧНОСТИ

И ПОЛЗУЧЕСТИ

Русинке К.Н.

В основополагающих по теории скольжения работах Б. Будянского составляющие пластической деформации известным образом выражаются через интенсивность сдвига φ_{ne} , которая задается в виде полинома по степеням компоненты касательного напряжения τ_{ne} (ℓ — направление скольжения в плоскости с нормалью n). В работах М.Я. Леонова введено понятие сопротивления сдвигу, зависящего от φ_{ne} ; само же φ_{ne} находится из условия, что в плоскостях и направлениях скольжения сопротивление сдвигу равняется τ_{ne} .

Отличные теории предназначены для определения пластической деформации и неприемлемы для нахождения деформаций ползучести.

Наряду с φ_{ne} рассмотрим функцию ψ_{ne} , называемую интенсивностью дефектов и связанную с φ_{ne} зависимостью

$$d\psi_{ne} = a d\varphi_{ne} - b \varphi_{ne} dt, \quad (I)$$

где $d\varphi_{ne}$ и φ_{ne} — приращение φ_{ne} и φ_{ne} за время dt при фиксированных ℓ и n , а a и b — параметры материала. Будем считать, что сопротивление сдвигу зависит от интенсивности дефектов ψ_{ne} . Она находится из условия, что сопротивление сдвигу равняется τ_{ne} в тех плоскостях и направлениях, в которых проходят скольжения в данный момент нагружения. В тех же системах ℓ и n , в которых скольжения отсутствуют ($d\varphi_{ne} = 0$), уравнение (I) описывает релаксацию дефектов. Таким образом, сопротивление сдвигу, зависящее от ψ_{ne} , обладает свойством возврата к своему исходному значению.

Интенсивность скольжения определяется из уравнения (I) и подставляется в формулы Б. Будянского. Определенное таким образом необратимое формоизменение является пластической деформацией при достаточно быстром нагружении и деформацией ползучести — при постоянном напряжении. Здесь отсутствует деление деформации на пластическую и вязкую части, а рассматривается необратимая деформация, протекающая во времени.

МИКРОПЛАСТИЧНОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ВНУТРЕННИМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ

Саррак В. И.

Среди различных видов внутренних напряжений в металлических материалах выделим остаточные локальные ("пиковые") внутренние микронапряжения, возникающие вследствие образования областей объемного растяжения при фазовых превращениях и пластической деформации. Эти напряжения локализуются в субмикроразмерах структуры — зонах, прилегающих к границам зерен или выделениям. Практически не обнаруживаемые обычными методами структурных исследований, они регистрируются по изменениям объема, внутреннего трения, модуля упругости, эффекта релаксации напряжений. Напряжения этого вида оказывают сильное влияние на сопротивление начальным пластическим деформациям, понижая напряжение микроразрывности материалов. Локальные "пиковые" микронапряжения понижают сопротивление разрушению металлических материалов.

Представляло интерес изучение влияния напряжений на размер зоны микропластической деформации перед концентратором напряжений (надрезом). Для этого был разработан метод определения величины остаточных внутренних эффективных напряжений. Метод основан на сравнении параметров замедленного разрушения высокопрочных сталей в структурных состояниях, различающихся лишь по величине остаточных локальных микронапряжений. Последние не оказывают влияния на напряжение разрушения при низких температурах, когда вклад термически активируемых процессов разрушения исключен и появление трещины определяется силовым критерием разрушения. С повышением температуры внутренние микронапряжения приводят к прогрессивному понижению напряжения возникновения трещины.

Размер зоны микропластической деформации перед надрезом падает с ростом уровня локальных внутренних микронапряжений, отражая уменьшение напряжения появления трещины.

РАЗЛИЧНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ТЕОРИИ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ФИЗИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ

Сахаров А.С., Бойко И.П., Козак А.Л., Дельник А.Е.

Рассматривается методика решения задачи упруго-пластического деформирования грунтов, основанная на применении моментной схемы метода конечных элементов. Для вычисления пластических деформаций $d\epsilon_{ij}^p$ грунта, пребывающего в предельном состоянии, используется теория пластического течения и дилатансионные соотношения, предложенные В.Н.Николаевским, в виде

$$d\epsilon_{ij}^p = \lambda(\chi) d\gamma_{ij}^p, \quad (*)$$

где $d\epsilon_{ij}^p$ и $d\gamma_{ij}^p$ — соответственно шаровая и девиаторная части $d\epsilon_{ij}^p$; λ — коэффициент дилатансии; χ — параметр упрочнения.

Широко используемый в расчётах различных материалов ассоциированный закон пластического течения не подтверждается большинством экспериментов, проводимых с нескальными грунтами. Ассоциированный закон, являющийся частным случаем модели (*) при $\lambda = \tan \psi = \text{const}$ (ψ — угол трения на октаэдрической площадке), предполагает постоянный уровень дилатансии одного знака (разрыхление в зоне сдвига), тогда как в экспериментах фиксируется и обратное явление — контракция (уплотнение при сдвиге рыхлых грунтов). Для всех видов нескальных грунтов в экспериментах зафиксировано $\lambda < \tan \psi$. Указанные выше свойства грунтов не позволяют использовать для описания их работы также условие пластической нежимаемости ($\lambda = 0$).

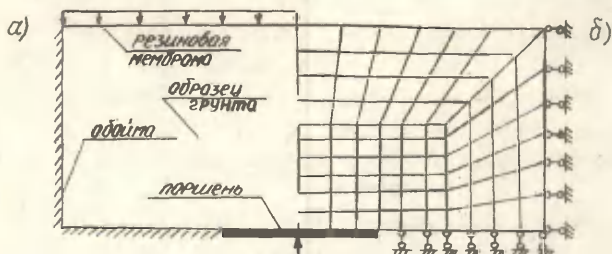


Рис. 1. Расчётная схема /а/ и сетка МКЭ /б/ грунта в осесимметричном сдвиговом приборе.

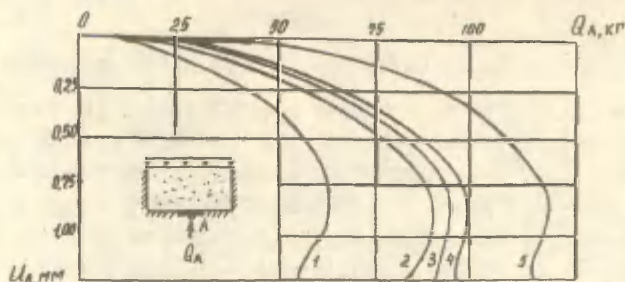


Рис. 2. Графики "нагрузка-осадка" для точки А
 $1/\lambda = 0$; $2/\lambda = \lambda_1(\chi)$; $3/\lambda = \lambda_2(\chi)$; 4/ натурный эксперимент; $5/\lambda = \lambda_0 \psi$.

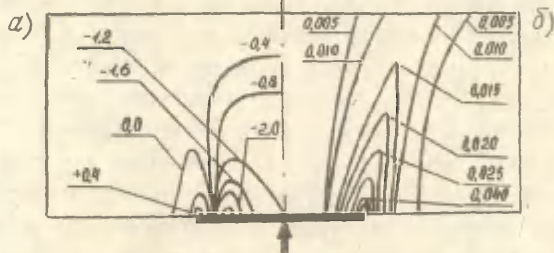


Рис. 3. Изолинии а/ вертикальных напряжений /МПа/ и б/ объемных пластических деформаций при $U_A = 1,00$ мм / $\lambda = \lambda_2(\chi)$ /.

В решении ряда задач (например, рис. 1-3) показано, что использование для коэффициента дилатансии функций $\lambda = \lambda_1(\chi)$ [1] и $\lambda = \lambda_2(\chi)$ [2] позволяет достичь адекватного описания особенностей формирования н.д.с. грунта с учётом его нелинейной работы, выявить резервы несущей способности оснований и оценить надёжность существующих приближённых методов их расчёта.

Л и т е р а т у р а

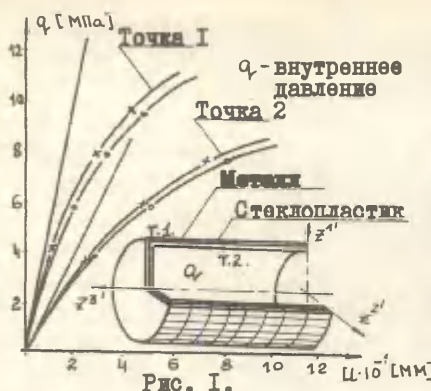
1. Николаевский В.Н., Сырников И.М., Шефтер Г.М. Динамика упруго-пластических дилатирующих сред. - Успехи механики деформируемых сред. Сб.статей. М.: Наука, 1975, с. 397-413.
2. Николаевский В.Н. Определяющие уравнения пластического деформирования сыпучей среды. - ПММ, 1971, т. 35, № 6.

БОЛЬШИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕЧНЫХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ

Сахаров А.С., Гондих А.В., Данг Ху Кун, Козак А.Д.

Рассматривается методика к результату численного моделирования процесса образования и развития зон предельного состояния материала (пластичность и разрушение) в ходе нагружения оболочечных конструкций в геометрически нелинейной постановке. Исследуются однородные и композитные, включая многослойные, оболочки. Используется эффективный вариант МКЭ — моментная схема. Применяется уточненная теория слоистых оболочек, позволяющая учесть неоднородность деформаций сдвига по толщине пакета, обусловленную различием физико-механических характеристик слоев и расслоением. Развитие пластических деформаций по толщине металлического монослоя моделируется на основе ассоциированного закона пластического течения и условия Мизесса, а при вычислении погонных усилий используется численное интегрирование по 5-точечной квадратурной формуле Гаусса. Прочность композитного монослоя проверяется по феноменологическим критериям Норриса, ХOFFмана и др., а разрушение моделируется как приобретение материалом в локальной области специальных анизотропных свойств, обусловленных наличием трещин. Реализован метод интегрирования по параметру в сочетании с алгоритмом Ньютона-Канторовича.

Решен ряд тестовых задач, приводятся результаты исследования сложных реальных конструкций. На примере расчета двухслойной (металл-стеклопластик) цилиндрической защитной оболочки электромагнитного привода (рис. 1) показано достаточно хорошее согласование с экспериментом, результаты которого опубликованы А.Дусматовым. Результаты исследования неподкрепленного крестообразного сопряжения стальных цилиндрических оболочек при осевой нагрузке (рис. 2) свидетельствуют о том, что совместный учет физической и геометрической нелинейности приводит к уменьшению значения предельной нагрузки на 20% по сравнению с расчетом, когда учитывается только пластическая работа материала. Локальная зона пластичности образуется уже при нагрузке $P=0,28P_*$, но до $P=0,93P_*$ не прогрессирует. Пока распространение зоны пластичности не



приведет к увеличению деформативности узла, геометрически нелинейная постановка мало сказывается на результатах расчета. В свою очередь, при $P = 0,93P_*$ учет больших перемещений ускоряет развитие пластичности. Изложенное подтверждает необходимость учета обоих факторов нелинейного поведения конструкций.

Пластическое деформирование цилиндрического экрана электромагнитного привода: — — — линейное решение; — — — нелинейное решение; — — — эксперимент.

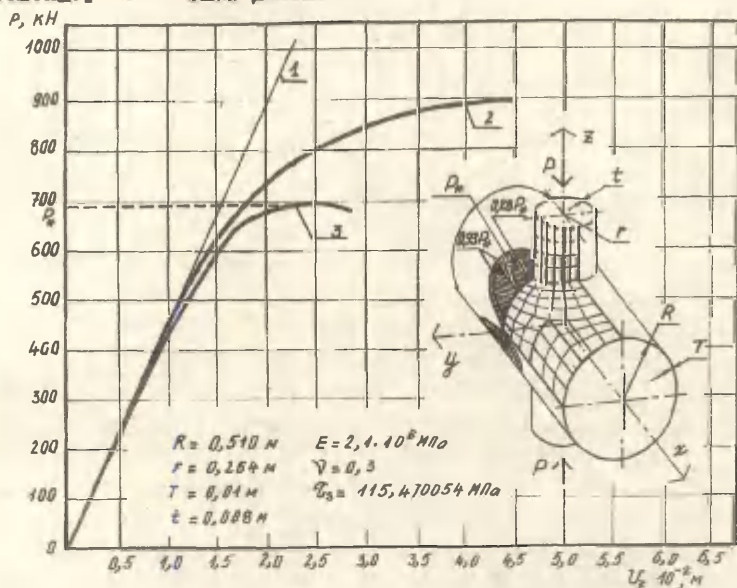


Рис. 2. Крестообразный трубчатый узел: 1—линейно-упругий расчет; 2—физически нелинейный; 3—с учетом пластичности и больших перемещений (показано развитие зон пластичности).

РИСК РАЗРУШЕНИЯ СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПОСЛЕ ОБРАЗОВАНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ ШАРНИРОВ

Синицын А. П.

1. Математическая теория риска за последнее время все шире внедряется в практику инженерных расчетов и позволяет найти наиболее эффективные решения при создании сложных инженерных конструкций. Такие расчеты выполняются с учетом того, что данное сооружение подвергается неизбежному риску, который возникает в связи с ограниченной достоверностью исходных данных, положенных в основу расчета. Общий метод вычисления риска был предложен автором на V Всесоюзном съезде по теоретической и прикладной механике в 1981 г. в докладе "Сбалансированный риск в стохастическом методе строительной механики".

2. В настоящем докладе изучается изменение величины риска статически неопределимой системы после образования в ней пластических шарниров. Величина риска определяется в предположении, что в процессе деформирования конструкции происходит потери ее несущей способности, которая зависит от критического значения параметров, характеризующих свойства системы.

3. Расчет выполняется, учитывая совместную работу сооружения и основания. Учитывается вращательное движение элементов конструкции в шарнирах и возможная потеря устойчивости основания.

4. Сравнение этих двух случаев показывает, что если не учитывать совместную работу конструкций основания, то риск получается сравнительно небольшой. По шкале риска это значение находится между естественным и умеренным риском, то есть конструкции может эксплуатироваться.

5. Если же уточнить расчет и учесть совместное напряженно-деформированное состояние конструкции и основания, то величина риска резко возрастает, и система "конструкция-основание" оказывается ненадежной.

6. Для облегчения практического использования результатов составляются графики. По ним рассчитаны неразрезные балки, арки, фермы, рамы и другие конструкции. Для каждой задачи вычисляется риск после возникновения каждого нового шарнира. Путем сопоставления результатов этих расчетов определяется уточненное значение предельной нагрузки в зависимости от обоснованной величины риска.

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ В МОНОКРИСТАЛЛАХ ЦИНКА И ЕГО СВЯЗЬ С НЕУСТОЙЧИВОСТЬЮ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ

Сокольский С.В., Лаврентьев Ф.Ф., Салита О.П.

В работе представлены результаты исследования в интервале температур 4,2 – 293 К неустойчивости пластического течения в системе скольжения $(0001)\langle 11\bar{2}0 \rangle$ монокристаллов цинка, упрочненных дислокациями леса в системе $\{11\bar{2}2\}\langle 11\bar{2}3 \rangle$.

Установлено, что созданное дислокациями леса упрочненное состояние неустойчиво к воздействию сдвиговой нагрузки в плоскости (0001) , что проявляется в скачкообразном характере протекания пластической деформации и последующем катастрофическом разупрочнении материала при релаксации напряжения и повторных деформированиях. При некоторой критической плотности дислокаций леса ($\rho_f \gg 10^6 \text{ см}^{-2}$) пластическая деформация развивается крайне неоднородно и локализуется в крупных полосах скольжения. Обнаружено, что разупрочнение обусловлено уменьшением плотности дислокаций леса, которое происходит в полосах базисного скольжения, то есть в местах протекания активной пластической деформации. Амплитуда скачков деформации максимальна при 77 К, а их появление коррелирует с возникновением более мощных полос скольжения. Эффект разупрочнения и соответствующего выметания дислокаций леса максимален при 293 К и исчезает при 4,2 К.

Предполагается, что для упрочненных монокристаллов цинка имеет место смена механизма пластической деформации при переходе от 77 к 4,2 К, которая вызывается существенным уменьшением подвижности пирамидальных дислокаций в этом интервале температур. При температуре ≥ 77 К протекание процесса, по-видимому, контролируется трансформацией и аннигиляцией введенных дислокаций леса в областях высокой концентрации напряжений перед лавинообразно движущимися скоплениями базисных дислокаций. При 4,2 К определяющим становится процесс продавливания базисных дислокаций, сопровождающийся появлением тонких и более равномерно распределенных линий скольжения, а сформированная ранее упрочняющая структура оказывается устойчивой к механическому воздействию.

КРИТЕРИЙ УСТОЙЧИВОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТЬ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ МЕДЬ-ГАЛЛИЙ

Соллертинская Е.С., Данышина Л.Г., Давелдзя Г.В., Дыпин М.И.

В меди и медных сплавах на температурной зависимости такого показателя пластичности, как удлинение, практически всегда наблюдается минимум при температурах 250–350°C. Снижение пластичности при этих температурах обычно связывают с изменением механизма разрушения – вязкого при низких температурах и хрупкого при средних. Однако это не всегда справедливо. Величина удлинения при испытаниях на растяжение может определяться потерей устойчивости деформации, приводящей к образованию шейки и разрушению образца.

При низких и средних температурах, когда отсутствует чувствительность напряжения течения к скорости деформации, условием устойчивости является соотношение $\theta = \frac{dS}{d\varepsilon} \geq S'$,

где S' – истинное напряжение течения,

ε – истинное (логарифмическое) удлинение.

Анализ кривых растяжения в координатах $S' - \varepsilon$ показывает, что с повышением температуры уменьшение коэффициента упрочнения с деформацией происходит быстрее, критерий устойчивости выполняется при меньших деформациях, удлинение падает, но разрушение во многих случаях остается вязким. При температурах выше 400°C меняется механизм деформации, интенсивно протекают процессы динамического возврата. В этих условиях простой критерий устойчивости становится неприменимым.

В настоящей работе были проанализированы кривые растяжения сплавов $Cu-Ga$ с концентрацией галлия от 0 до 19 ат.% при температурах от -196°C до 400°C. Были построены зависимости напряжения течения S' и коэффициента упрочнения θ от степени деформации. Точка пересечения графиков, где $\theta = S'$, соответствует выполнению критерия устойчивости, и ее координаты ε_K и S_K легко могут быть найдены. Реальное значение равномерного удлинения ε_p

отвечает максимальной нагрузке P на кривой растяжения. Были также построены зависимости ϵ_K и ϵ_p и S_{max}/θ_{min} от температуры (рис. 1 и 2).

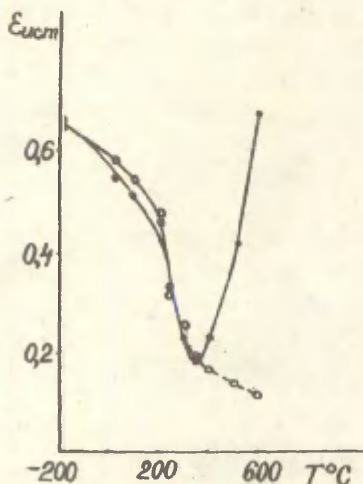


Рис.1 Температурная зависимость реального ϵ_p (•) и критического ϵ_K (○) удлинения в сплаве $Cu-18at\% Ga$.

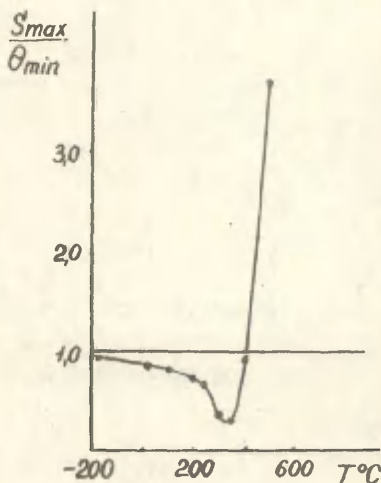


Рис.2 Температурная зависимость отношения S_{max}/θ_{min} в сплаве $Cu-18at\% Ga$.

Проведенный анализ показал, что минимум на температурной зависимости удлинения можно связывать с хрупким разрушением только в том случае, если отношение S_{max}/θ_{min} становится существенно меньше 1.

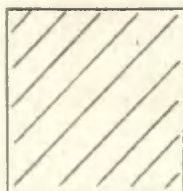
В сплавах системы медь-галлий разрушение остается вязким при всех температурах вплоть до концентраций ~ 10 ат.%. Хрупкое разрушение происходит при температурах $300 - 350^\circ C$ в сплавах с концентрацией галлия выше 10 ат.%.

ДЕЛОКАЛИЗАЦИЯ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В МОЛИБДЕНЕ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

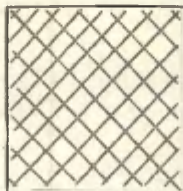
Стрельцов В.А., Эфрос Б.М.

Исследования пластической деформации и процесса разрушения в условиях высоких давлений показывают, что они протекают иначе, чем в ординарных условиях [1-3]. Одним из главных отличий при этом является эффект делокализации пластической деформации твердых тел. Это означает, что, начиная с некоторого значения давлений, формирование дефектной структуры идет гомогенно по всему объему деформируемого кристалла.

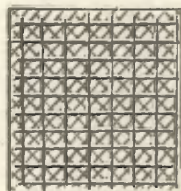
В работе показано, что область давлений, где эффект делокализации деформации начинает проявляться, соответствует интервалу: $P_c < P < P_0$. Здесь P_c - давление, выше которого твердое тело пластифицируется, а P_0 - характерное давление, соответствующее сильному уменьшению термических флуктуаций. Оценка указанных величин составляет для $P_c \sim 10^{-3} \cdot B$ и $P_0 \sim 10^{-2} \cdot B$, где B - модуль всестороннего сжатия. Макроскопически эффект делокализации проявляется в параболизации кривой упрочнения, изменении соотношения между упрочнением и динамическим возвратом [3]. При исследовании структуры наблюдается реализация множественного скольжения. Схематически изображение формирования полос скольжения при одной и той же степени деформации может быть представлено следующим образом:



$P < P_c$



$P_c < P < P_0$



$P > P_0$

Обсуждаются физические причины делокализации пластической де-

формации. В этой связи изучение путей делокализации деформации важно проводить при различных методах обработки с использованием давлений.

Экспериментально изучены структурные изменения ОЦК поликристаллического малолегированного сплава молибдена в зависимости от степени деформации в условиях высоких гидростатических давлений. В качестве способа деформации был использован процесс выдавливания твердых тел жидкостью высокого давления, который осуществлялся при комнатной температуре и разных уровнях давления выдавливания.

Делокализация пластической деформации под давлением начинается уже на ранних стадиях упрочнения, что сказывается на формировании структуры при больших деформациях. Это обстоятельство также отмечается в работах [4, 5]. Повышение степени деформации до $\varepsilon \approx 0,92$ и давления выдавливания до $P \approx 2000$ МПа приводит к качественному изменению исходной полиэдрической структуры в поперечном сечении экструдатов сплава молибдена вследствие проявления структурной неустойчивости при пластической деформации под давлением. Наблюдается появление "вихревой" структуры. Отмечается, что рост давления выдавливания при данной степени деформации инициирует формирование "вихревой" структуры.

Экспериментальные данные свидетельствуют, что делокализация пластической деформации сопровождается активизацией большого количества источников сдвигов, в том числе и вдоль "запрещенных" систем скольжения. С ростом давления уменьшаются локальные перенапряжения, способствующие зарождению микротрещин, а также ускоряется динамическое залечивание уже имеющихся несплошностей. Отмечается, что наблюдаемые особенности дефектной структуры сплава молибдена могут приводить к заметному повышению уровня прочностных и пластических свойств.

1. Акимов Г.Я., Стрельцов В.А., Зайцев В.И. ФТВД, 1981, №4, с. 50-60.
2. Стрельцов В.А., Акимов Г.Я. и др. ФТВД, 1983, №12, с. 60-80.
3. Акимов Г.Я., Стрельцов В.А. и др. ФТВД, 1982, №8, с. 65-71.
4. Хапланова Т.Е., Береснев Б.И. и др. ФММ, 1976, 42, с. 637-647.
5. Береснев Б.И., Эфрос В.М. и др. ДАН УССР, 1983, №7, с. 81-84.

ОБ ОДНОМ ВАРИАНТЕ ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РЕОНОМНОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ МЕТАЛЛОВ

Супрун А.Н.

Стремление к учёту многочисленных механических свойств металлов (в частности, временных эффектов) в рамках единых определяющих соотношений может привести к возникновению внутренних противоречий, проявляющихся, например, в предсказании явлений, которые в реальных материалах возникнуть не могут. Устранение указанных недостатков теории может быть достигнуто за счёт применения некоторой единой механико - математической концепции, объединяющей систему определяющих уравнений. В качестве такой концепции могут быть использованы основные положения теории ассоциированного течения о существовании в пространстве напряжений поверхности текучести (ПТ) и градиентальности к ней вектора скорости развития неупругих деформаций. При этом описание эффектов ползучести, возврата пластических свойств, деформационного старения, эффекта Баушингера, поперечного эффекта будет осуществляться за счёт перемещения, формоизменения и поворота во времени несферической (гиперэллиптической) ПТ. Разработанные автором ранее варианты такой теории могут быть обобщены с помощью следующих соотношений (закон развития девиатора неупругих деформаций ϵ_{ij}^H при активном нагружении) :

$$d\epsilon_{ij}^H = \alpha_{ij} dq,$$

$$\alpha_{ij} = [(1-\alpha^2)\psi \delta_{ij}^* + \alpha^2 \varphi_{ij}] / \sqrt{(1-\alpha^2)\psi^2 + \alpha^4},$$

$$dq = \sqrt{d\epsilon_{ij}^H d\epsilon_{ij}^H}, \quad \alpha = a/b, \quad \psi = T_{ij} \delta_{ij}^* / T, \quad T_{ij} = S_{ij} - z_{ij},$$

$$\delta_{ij}^* = T_{ij} / T, \quad T = \sqrt{T_{ij} T_{ij}}, \quad \delta_{ij}^* = z_{ij} / \sqrt{z_{mn} z_{mn}},$$

$$a = S_0 + \int_{t_0}^t [L_1(t-\tau) \dot{\epsilon}_{ij}(\tau) + L_2(t-\tau)] dq(\tau),$$

$$b = s_0 + \int_{t_1}^t [L_1(t-\tau)\xi_1(\tau) + L_2(t-\tau)] dq(\tau),$$

$$\epsilon_{ij} = \int_{t_1}^t L_3(t-\tau) de_{ij}^n(\tau),$$

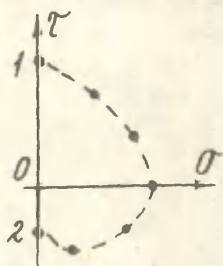
$$\xi_1 = 2\alpha_1^2 - 1, \quad \xi_2 = 1 - 2\alpha_1^2, \quad \alpha_1 = \alpha_{ij}\delta_{ij},$$

где L_1, L_2, L_3, S_0 — функции и константа материала, S_{ij} — девиатор напряжений, t_1 — время выхода в пластичность. При $L_1 + L_2 = (1-\omega)L/2, L_2 - L_1 = \beta L, L_3 = (1+\omega)L/2$ (ω, β, L — постоянные и функция материала) и

$\xi_1 = (1-\omega)\alpha_1^2/2 + \beta(1-\alpha_1^2), \quad \xi_2 = (1-\omega)(1-\alpha_1^2)/2 + \beta\alpha_1^2$ получим один из вариантов предложенной автором ранее модели. При $L = a + b \exp(-\lambda t), a = 264; b = 528; S_0 = 528$ (МПа);

$\omega = 2; \beta = 3,6; \lambda = 0,09 \lambda^{-1}, \lambda$ — время, затрачиваемое на одно измерение положения точки границы текучести, введенные соотношения описывают процесс развития деформаций при сложном нагружении по траектории, лежащей внутри ПТ [Луков А.М., В кн.: Вопросы теории пластичности, 1961]. Результат объясняется тем, что в момент повторного нагружения ПТ частично возвратилась к своему исходному состоянию.

Той же причиной можно объяснить некоторые опытные наблюдения нерегулярности и вогнутости ПТ. Действительно,



но, если после закручивания образца считать точку нагружения I (см. рис.) за точку ПТ, найти положение точки 2, а затем приступить к зондированию промежуточных точек, то за счёт того, что каждая из определенных точек принадлежит непрерывно возвращающейся к исходному состоянию ПТ, может быть получена угловая точка (т. I) и участок вогнутости тыльной части ПТ (т. 2).

Следует заметить, что учёт временных эффектов при решении краевых задач пластичности в некоторых случаях оказывает существенное влияние на определяемое НДС.

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ПОЛОГОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПАНЕЛИ ПРИ БОЛЬШИХ ЗАКРИТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЯХ

Улитин В.В.

Рассматривается физически и геометрически нелинейная задача для пологой цилиндрической панели, находящейся под действием внешнего равномерного давления, которое существенно превышает критическое. Панель теряет устойчивость и прогибается к центру кривизны, причем стрелка прогиба во много раз превышает ее толщину h . Деформации срединной поверхности описываются зависимостями нелинейной теории оболочек, физическое состояние — условием пластичности Мизеса. Целью работы было установить зависимость между прогибом и величиной давления и величину разрушающей нагрузки.

Для решения задачи использовался кинематический подход, при котором значение нагрузки, отвечающее данной величине прогиба, определялось как нижняя граница нагрузок, отвечающая ряду кинетически возможных форм прогиба, который аппроксимировался выражением вида

$$w = \sum w_k \cdot \varphi_k.$$

Функции φ_k образуют полную систему функций, удовлетворяющих условиям закрепления панели. При этом условии значение действующей нагрузки представляет собой точную нижнюю границу значений нагрузок, отвечающих всевозможным формам прогиба:

$$p = \inf \{ p(w_k) \}.$$

Получено общее выражение для нагрузки

$$p = \frac{9\sigma_T}{8\sqrt{3}} \int_S \sqrt{\psi} dS,$$

где γ — квадратичная форма от параметров w^* . Задача математического программирования на определение минимума этого выражения решалась на ЭВМ.

С помощью известного приближенного выражения для интенсивности деформаций через величину наибольшей деформаций сдвига, получено приближенное выражение

$$\rho = \frac{4\sigma_s h}{R} \left\{ \left[\left(\frac{R}{a} \right)^2 + \left(\frac{R}{b} \right)^2 \right] \frac{w^*}{h} - 0,156 \right\},$$

где R — радиус, a и b — длина и ширина панели.

Из этой зависимости в предположении, что разрушение пластичного материала происходит тогда, когда интенсивность деформации достигнет величины относительного остаточного удлинения σ^* , получено выражение для разрушающей нагрузки

$$\rho^* = \frac{4\sigma_s h}{R} \left\{ \left[1 + \left(\frac{a}{b} \right)^2 \right] \frac{w^* R}{a^2} - 0,3125 \right\},$$

где σ_s — предел прочности, w^* — стрела прогиба в момент разрушения.

$$w^* = \begin{cases} = b \cdot \sqrt{0,2\delta}, & a/b \geq \sqrt{2}; \\ = b \cdot \sqrt{0,1\delta}, & a/b < \sqrt{2}. \end{cases}$$

Проводились испытания стальных панелей с размерами $h=0,6$ мм, $R=300$ мм, $a=150$ мм, $b=104,7$ мм. Нарушение устойчивости наблюдалось при давлениях 0,03–0,05 МПа. Затем давление повышалось до 0,35 МПа. Обмеры остаточных прогибов 20 панелей дали среднее значение стрелки прогиба 10,7 мм; расчеты по точной формуле 10,1 и по приближенной — 11,3 мм.

Таким образом, показано, что пологие цилиндрические панели в закритическом состоянии обладают существенным запасом несущей способности и могут выдержать давление примерно на порядок выше критического.

СМЯГЧЕННО-СМЕШАННЫЕ СХЕМЫ МКЭ В ЗАДАЧАХ ТЕОРИИ ПЛАСТИЧНОСТИ И ВЯЗКОПЛАСТИЧНОСТИ

Уманский С.Э., Романченко С.А.

Расчетная практика показывает, что точность определения напряжений с помощью схем метода конечных элементов (МКЭ) в перемещениях при не слишком густых разбиениях часто бывает неудовлетворительной. Традиционные способы повышения точности путем увеличения густоты разбиений или перехода к более сложным элементам не всегда эффективны даже в случае линейных задач. Для нелинейных и нестационарных уравнений они практически неприемлемы, поскольку увеличение порядка решаемой системы, умножаясь на большое количество временных шагов и итераций, ведет к лавинному нарастанию вычислительных затрат.

По сравнению с наиболее распространенными схемами метода конечных элементов – схемами метода перемещений смешанные схемы МКЭ обеспечивают значительное уменьшение погрешности вычисления напряжений при сохранении того же порядка точности вычисления перемещений. При этом, однако, обычные смешанные схемы менее алгоритмичны и требуют решения систем уравнений более высокого порядка по сравнению со схемами метода перемещений. Авторами доклада рассмотрен один из возможных путей преодоления этих недостатков и разработаны простые и весьма эффективные варианты смешанных схем МКЭ (смягченно-смешанные схемы) для решения задач теории пластичности и вязкопластичности.

Выделены три основных класса уравнений состояния материала: соотношения с конечной связью между напряжениями и деформациями, соотношения инкрементального и кинетического типа. В рамках каждого из перечисленных классов задач алгоритм смягченно-смешанного МКЭ практически инвариантен по отношению к конкретным особенностям уравнений состояния, описывающих неупругое деформирование материала. В задачах динамики и эволюционных квазистатических задачах МКЭ сочетается с центрально-разностной аппроксимацией по времени.

Отличительной особенностью предложенных схем является, в первую очередь, методика построения системы уравнений дискретизованной задачи, позволяющая диагонализировать все матрицы, не содержащие производных от интерполяционных функций. С этой целью некоторые слагаемые в соответствующих вариационных уравнениях вычисляются приближенно (смягчаются) с помощью специальных кубатурных формул. Кроме того, разработаны итерационные методы, позволяющие быстро решать полученную систему линейных и нелинейных уравнений.

При весьма общих предположениях о неупругих свойствах материала получены теоретические оценки точности смягченно-смешанных аппроксимаций, а также доказана сходимость используемых итерационных процедур. Погрешность некоторых вариантов предложенных схем оценена также с помощью численных экспериментов. В случае эволюционных задач исследована также устойчивость соответствующих разностных аппроксимаций по времени. Для вязкопластических задач разработана полунеявная схема пошагового интегрирования уравнений состояния, обеспечивающая устойчивость процесса вычислений независимо от величины временного шага.

Применительно к динамическим задачам, а также задачам нестационарной теплопроводности предложен и теоретически обоснован способ диагонализации матриц масс (теплоемкости), позволяющий без потери точности существенно снизить вычислительные затраты.

Представлены общие принципы численной реализации смягченно-смешанных схем МКЭ на ЭВМ. Описаны характеристики разработанного программного обеспечения, включающего в себя пакет прикладных программ "Термомеханика", который позволяет решать плоские и осесимметричные задачи термопластичности и термовязкопластичности, а также задачи термоупругости и термовязкоупругости. Кроме того, разработана новая версия пакета для исследования напряженно-деформируемого состояния осесимметричных тел при действии на них произвольных нагрузок. Пакет включает программные средства для автоматизированной разбивки произвольной области на конечные элементы и наглядного представления результатов расчета.

В докладе приведены примеры решения тестовых и реальных задач, выполненных с использованием вычислительного комплекса "Термомеханика".

ФОРМИРОВАНИЕ ТЕКСТУРЫ НИКЕЛИДА ТИТАНА ПРИ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИИ

Фавстов Д.К., Меньшиков А.Э., Ивкусин В.А.

Исследование факторов, обеспечивающих оптимизацию функциональных свойств сплавов с памятью форм, является необходимой предпосылкой их промышленного освоения.

Деформационно силовые и температурные характеристики сплавов на основе никелида титана определяются составом технологии изготовления, режимами термоциклирования.

В представленной работе исследовано влияние силового термоциклирования на формирование текстуры и эффект памяти формы сплава эквивалентного состава.

В работе использовали сплав, содержащий 54,7 вес.% Ni, ост. Ti. Исследование ЭПФ, модуля сдвига и съёмку нейтронограмм проводили на одних и тех же образцах. Для построения текстурных максимумов использовали шарообразные образцы.

Экспериментально установлено, что в процессе многократного термоциклирования уменьшается деформация, приобретаемая сплавом в интервале температур $M_n + M_k$, увеличивается ЭПФ, формируется ОЭПФ.

Величина необратимой части деформации в каждом термоцикле зависит от напряжения и накапливается в процессе многократного термоциклирования.

Исследование модуля сдвига при температуре M_k показало, что для недеформированного состояния его величина составляет 1900 ± 2000 кг/мм² и в результате термоциклирования уменьшается до 800 ± 900 кг/мм².

Накопление необратимой деформации сопровождается изменением соотношения интенсивности линий на нейтронограммах.

Исследование текстурных максимумов линий (100)_{B2} и (011)_{B19} образцов, полученных экструзией, показало, что они имеют аксиальную текстуру.

При деформации методом кручения формируется новая винтовая текстура, в связи с чем наблюдается увеличение ЭПФ, снижение модуля сдвига, изменение интенсивности линий на нейтронограммах.

ЭФФЕКТ ПАМЯТИ ФОРМЫ В СПЛАВАХ НА ОСНОВЕ НИКЕЛИДА ТИТАНА ЛЕГИРОВАННЫХ ГАФНИЕМ

Фавстов Д.К., Искушкин В.А., Ермаков В.М.

Легирование является наиболее эффективным методом повышения силовых характеристик эффекта памяти формы и регулирования температурного интервала реализации мартенситного превращения в сплавах на основе никелида титана.

Исследования в этом направлении связаны с созданием новых сплавов ЭПФ с повышенными эксплуатационными характеристиками.

В работе приведены результаты комплексного исследования влияния легирования на деформационно силовые и температурные характеристики эффекта памяти формы.

Показано, что введение гафния приводит к увеличению силовых характеристик ЭПФ и смещению интервала температур мартенситного превращения в сторону их понижения.

Например, при легировании сплава 4,4 вес.% гафния реактивное напряжение достигает 120 кг/мм^2 , что в два раза превосходит реактивное напряжение эквивалентного сплава. Значительно увеличивается максимальная удельная работоспособность легированного сплава, которая составляет $3,6 \text{ кг} \cdot \text{м/см}^3$.

По мере увеличения содержания гафния в сплавах эффект памяти формы, измеряемый при нагреве ненагруженного образца, уменьшается.

При сравнении со сплавами эквивалентного состава отмечено значительное уменьшение кристаллографически необратимой деформации, в связи с чем обсуждается её влияние на ограничение реактивного напряжения.

Легирование никелида титана гафнием в количестве 0,97 вес.% приводит к незначительному смещению температур мартенситного превращения в сторону их понижения относительно аналогичных температур эквивалентного сплава. При содержании гафния 2,9 вес.% температура $M_{0,5}$ уменьшается до -80°C , а при 4,4 вес.% — до -180°C . Температурный интервал обратного мартенситного превращения изменяется в соответствии с изменением температур прямого мартенситного превращения, однако наблюдается увеличение температурного гистерезиса.

ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ДЕФОРМАЦИИ МАЛОЛЕГИРОВАННЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ МОЛИБДЕНА И ВОЛЬФРАМА

Фирстов С.А., Иголкина Л.С., Косачев Л.С.

Для металлов УІА группы существует сильная зависимость механических свойств от структурного состояния. Наибольший интерес представляют высокотемпературные применения этих металлов, поэтому важно выяснить температурный интервал существования структурного упрочнения и возможные причины разупрочнения.

Были исследованы механические свойства малолегированных сплавов молибдена и вольфрама, а также изменения дислокационной структуры, происходящие в процессе пластической деформации. Сравнивались образцы спеченных и литых материалов с различным размером зерна.

Мелкозернистый спеченный молибден остается прочнее крупнозернистого до 1200°C . Эффективность упрочнения при измельчении зерна изменяется с температурой и возможно связана со снижением коэффициента K_y в уравнении Холла-Петча. Это снижение может быть за счет появления дополнительного механизма деформации – проскальзывания по границам зерен. Соотношение между внутризеренным скольжением и межзеренным проскальзыванием определяется температурно-скоростными условиями деформации, а также структурой. Повышение температуры деформации способствует упорядочению структуры границ, что также приводит к снижению коэффициента K_y .

Различные соотношения процессов внутризеренного и межзеренного скольжения при увеличении температуры деформации приводят к немонотонному изменению с температурой относительного удлинения. В мелкозернистом молибдене зависимость $\delta(T)$ обнаруживает четкий максимум, положение которого зависит от скорости испытания. Поведение литого молибдена отличается монотонным повышением относительного удлинения в тех же температурно-скоростных условиях.

Совершенно аналогично ведут себя сплавы на основе вольфрама. Установлены существенные различия в механизме разрушения спеченных и литых сплавов.

СВЕРХУПРУГОЕ И НЕОБРАТИМОЕ ДВОЙНИКОВАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ СПЛАВОВ ИНДИЙ-СВИНЕЦ

Фоменко Л.С., Лубенец С.В., Старцев В.И.

Пластическая деформация монокристаллов сплавов индий-свинец отличается двумя особенностями:

1. В области температур $T \leq 300$ К напряжение начала двойникования твердых растворов с содержанием свинца $c \geq 6$ ат.% существенно ниже предела текучести скольжением.

2. При статических испытаниях со скоростями деформации $\dot{\epsilon} \leq 10^{-4}$ с⁻¹ в интервале температур 0,5 - 180 К двойникование указанных сплавов является сверхупругим, то есть обратимым даже при сдвиговой деформации $\gamma \approx 5-7$ %. При более высоких температурах двойникование становится необратимым. Нагружение с высокими скоростями (удар) смещает температурную область проявления сверхупругости вплоть до $T = 300$ К. Сверхупругое двойникование атермично. При $T > 200$ К деформация приобретает термически активированный характер.

Изучение временных и температурных зависимостей параметров сверхупругой деформации позволило установить природу обратимого двойникования. Наиболее однозначной и хорошо воспроизводимой оказалась зависимость напряжения начала раздвойникования $\tau_u(t, T)$ от времени выдержки под постоянной нагрузкой и температуры. Согласно данным эксперимента в переходной области температур 190-205 К

$$\tau_u(t) = \tau_u(0) \exp(-t/t_0), \quad (1)$$

$$t_0(T) = t_0(\infty) \exp(\Delta H/kT), \quad (2)$$

где $\Delta H \approx 0,59$ эВ, $t_0(\infty) = 10^{-12}$ с. Релаксационный характер перехода от сверхупругого двойникования к необратимому (ур.(1)) и значения активационных характеристик указывают на определяющую роль в этом процессе диффузионных перемещений атомов в твердом растворе, структура которого нарушается при двойниковании. Сверхупругость должна наблюдаться в том случае, когда релаксационные процессы подавлены, то есть при низких температурах и высокоскоростных изменениях напряженного состояния. Этот вывод согласуется с опытом.

УРАВНЕНИЯ ТЕОРИИ ПЛАСТИЧНОСТИ ПРИ ОДНОСКОРОСТНОМ ПОТОКЕ ДИСЛОКАЦИЙ

Ханнанов Ш.Х.

Упруго-пластическое поведение кристаллического тела определяется как упругими β_{kl} , так и пластическими β_{kl}^p дисторсиями. Упругие дисторсии связаны с внешними напряжениями простыми соотношениями, выражаемыми законом Гука. Для пластических дисторсий таких простых соотношений не существует. Физически это связано со сложным характером эволюции дислокационных ансамблей, участвующих в процессе пластического деформирования. В общем случае физическое (статистическое) описание пластического деформирования сопряжено с решением уравнений кинетики для функций распределения дислокаций. Сложность этих уравнений не позволяет получить в явном виде определяющие уравнения для скорости пластической дисторсии $\dot{\beta}_{kl}^p$. Однако в частном случае односкоростного потока дислокаций, как показано в данной работе, удается из первых принципов получить определяющее уравнение для $\dot{\beta}_{kl}^p$ вида

$$\dot{\beta}_{kl}^p = -\beta_{kl,m}^p V_m + \beta_{ml,k}^p V_m, \quad (I)$$

где V_m - скорость дислокаций, задаваемая физическим законом движения дислокаций

$$\vec{V} = \vec{V}(\sigma_{ij}^+). \quad (2)$$

Здесь σ_{ij}^+ - эффективные упругие напряжения, индекс после запятой обозначает дифференцирование по соответствующей декартовой координате. Уравнения (I), (2), дополненные уравнениями для определения эффективных упругих напряжений σ_{ij}^+ , составляют замкнутую систему, описывающую пластическое течение кристаллического тела. Полученные уравнения применимы в условиях больших градиентов пластической дисторсии, когда преобладают геометрически необходимые (некомпенсированные) дислокации с ненулевым тензором плотности $\alpha_{pl} \neq 0$. Такая ситуация возникает, например, при распространении упруго-пластических волн.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДВУХ ФУНКЦИОНАЛОВ ПРИ РЕШЕНИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧ ПЛАСТИЧНОСТИ

Цатурова Д.С.

Рассматривается активное нагружение в рамках нелинейной теории упругости. Уравнение равновесия в перемещениях представим в виде

$$-2 \frac{\partial_i}{\partial \epsilon_i} M D u = f, \quad (1)$$

где D — матрица дифференцирования,
 M — специальная числовая матрица,
 σ_i, ϵ_i — интенсивности напряжений и деформаций,
 u, f — функции перемещений и нагрузки по области.

Будем считать, что нелинейная функция $\sigma_i(\epsilon_i)$ обладает следующими свойствами:

$$\sigma_i(0) = 0, \quad \frac{1}{K} \leq \frac{d\sigma_i}{d\epsilon_i} \leq K. \quad (2)$$

При выполнении условий (2) нелинейные дифференциальные уравнения (1) всегда имеют единственное решение. Для их решения используется следующий подход: сначала выполняется их линеаризация на основе известных методов (упругих решений, Ньютона-Рафсона, продолжение по параметру и др.), а затем линеаризованные уравнения решаются методом конечных элементов (МКЭ) с использованием метода двух функционалов (МДФ). Сущность МДФ заключается в определении напряжений из аналога функционала Рейсснера при фиксированных перемещениях, определенных из Лагранжиана.

Для линеаризующих уравнений принят шаговый метод, для которого при расчленении нагрузки f на N равных час-

теи разрешающие уравнения имеют вид

$$-D^* [\delta_i' (u_n) M D (u_{n+1} - u_n)] = \frac{1}{N} f \quad (3)$$

$$n = 0, 1, 2 \dots N-1,$$

где $u_0 = 0$,

u_n - перемещение, полученное на предыдущем шаге,

$u_{n+1} - u_n$ - приращение перемещений.

Уравнения (3) допускают различные вариационные постановки, две из которых приводятся ниже

$$\int_{\Omega} \delta_i' (u_n) (M D (u_{n+1} - u_n), D v) d\Omega = \frac{1}{N} \int_{\Omega} (f, v) d\Omega \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \delta_i' (u_n) (M D (u_{n+1} - u_n), D v) d\Omega &= \\ &= \int_{\Omega} ((u_{n+1} - u_n) D^* \delta_i' (u_n) M D v) d\Omega. \end{aligned} \quad (5)$$

Выражение (4) по сути реализует минимизацию функционала Лагранжа. Из этого выражения определяются приращения перемещений $u_{n+1} - u_n$ на n этапе расчета. Выражение (5) реализует минимизацию аналога функционала Рейсснера при фиксированных значениях перемещений u_{n+1}, u_n . Напряжения, вычисленные из выражения (5), т.е. по схеме МДФ, имеют значительно большую точность, чем напряжения, вычисленные по традиционной схеме метода перемещений, т.е. из соотношений теории упругости на основе найденных из (4) перемещений u_{n+1}, u_n .

Применение МКЭ для приближенного решения линейризованных уравнений шагового метода вносит дополнительную погрешность, которая влияет на общую точность метода. Известно, что если погрешность МКЭ по напряжениям оценивается величиной порядка $1/N^2$, то общая погрешность шагового метода пропорциональна $1/N$.

В связи с этим повышение точности вычисления напряжений на основе использования МДФ повышает общую точность шагового метода, а, следовательно, и точность решения рассматриваемой задачи.

ПЛАСТИЧНОСТЬ И УПРОЧНЕНИЕ МЕДИ И ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ НА ЕЁ ОСНОВЕ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Цыпин М.И., Данелия Г.В., Соллертинская Е.С.,
Комник С.Н., Демирский В.В., Старцев В.И.

Медь и сплавы на её основе с марганцем и алюминием были испытаны на растяжение на низкотемпературной деформационной машине МДК - 0,25 конструкции ФТИНТ при температурах: 4,2, 20, 50, 77 и 300К. Концентрация алюминия в сплавах составляла: 0,5; 1,0; 3,2; 5,5; 7,2; 10,2 и 14,5 ат.%, марганца соответственно 0,24; 0,4; 2,8; 4,4; 6,4; 8,4; 13,5; 19,6 и 25,0 ат. %.

Установлено, что медь и её твердые растворы с алюминием и марганцем не охрупчиваются при низких температурах. Прочностные свойства и относительное удлинение сплавов указанных систем повышаются с понижением температуры от комнатной до 20 - 30К (для отожженного состояния значения относительного удлинения превосходят 100%). При дальнейшем понижении температуры этот рост прекращается.

Была изучена стадийность пластической деформации и определены коэффициенты упрочнения на второй стадии кривой течения для меди и сплавов при всех температурах испытания. Характерным для всех сплавов в отличие от меди является резко выраженная вторая стадия пластического течения с постоянным коэффициентом упрочнения. У сплавов с концентрацией легирующего элемента выше 3 ат.% при температурах 4,2 - 50К практически не наблюдается динамического возврата, т.е. деформация с линейным упрочнением продолжается вплоть до разрушения образца.

При содержании второго компонента до 3 - 5 ат.% коэффициент упрочнения на второй стадии пластического течения уменьшается по сравнению с медью, а при дальнейшем увеличении концентрации легирующих элементов в твердом растворе вновь увеличивается почти до исходного значения при всех температурах испытаний вплоть до 4,2К.

ЦИКЛИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ И РАЗУПРОЧНЕНИЕ ЧИСТОЙ МЕДИ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Цыпин М.И., Данелия Г.В.

Для меди МВЧ выше температуры $\sim 600^{\circ}\text{C}$, а для меди МОБ-Б выше $\sim 950^{\circ}\text{C}$ наблюдаются "пилообразные" кривые деформации при скорости испытания $\dot{\epsilon} = 0,001 \text{ мин.}^{-1}$, т.е. на кривых деформации упрочнение периодически сменяется разупрочнением.

Форма зубцов на "пилообразной" кривой деформации может быть описана "длиной зубца" – величиной деформации за цикл упрочнение – разупрочнение ($\bar{\epsilon}_c$) и "высотой зубца" – степенью разупрочнения ($\bar{\rho}$), определяемой как соотношение максимального напряжения за цикл к напряжению после разупрочнения. Увеличение температуры деформации обуславливает уменьшение отклонений в длине зубцов от некоторой средней величины с одновременным увеличением средней $\bar{\epsilon}_c$ табл. I.

Таблица I.

Параметры "пилообразных" кривых деформации при различных температурах испытания для литой меди МВЧ

Температура испытания, $^{\circ}\text{C}$	Скорость испытания $\dot{\epsilon} = 0,0066 \text{ мин.}^{-1}$		
	$\bar{\epsilon}_c$	$\bar{\rho}$	$\delta, \%$
800	2,9	1,2	100
900	6,1	2,0	200
1000	7,3	1,8	200

В тех случаях, когда "пилообразные" кривые деформации наблюдаются в некотором интервале $\dot{\epsilon}$, изменение скорости деформации обуславливает изменение формы зубцов на кривых деформации. С ростом скорости деформации, во-первых, уменьшается стабильность в размерах зубцов по мере развития пластической деформации, во-вторых, уменьшаются средние значения $\bar{\epsilon}_c$ и $\bar{\rho}$. Следует отметить, что тенденция к понижению "среднего" уровня напряжений течения на "пилообразных" кривых деформации связана с уменьшением скорости деформации по мере удлинения образца.

РОЛЬ ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЕФОРМАЦИИ В ПРОЯВЛЕНИИ МАСШТАБНОГО ЭФФЕКТА У ПЛАСТИЧНЫХ МЕТАЛЛОВ

Черноголазова Т.В., Мофа Н.Н., Пресняков А.А.

Для пластичных материалов существуют противоречивые сведения о степени проявления у них масштабного эффекта, которые до сих пор не нашли однозначного объяснения с позиции общепринятых теорий масштабного фактора. Отсутствуют функциональные зависимости механических свойств от размеров образцов в широком диапазоне их варьирования, позволяющие прогнозировать поведение при эксплуатации реальных изделий по данным испытания лабораторных образцов. Практически отсутствуют сведения о температурной зависимости масштабного эффекта.

Нами исследовалось влияние размеров цилиндрических образцов на показатели механических свойств бескислородной меди марки Моб-и латуни Л80 и Л63 в условиях холодной (20°), теплой ($200, 600$) и горячей (850°C) деформаций растяжением. Размеры исследуемых образцов изменялись в широком диапазоне: диаметр от 0,1 до 10 мм, длина от 20 до 100 мм, объем от 0,2 до 7854 мм^3 (в 4000 раз), кратность от 2 до 1000 (в 500 раз).

Из анализа экспериментальных данных была получены следующие результаты.

1. У пластичных материалов имеет место неоднозначное влияние диаметра a и длины образцов на показатели прочности и пластичности. Увеличение диаметра образцов ($l = \text{const}$) снижает прочность на 30% и увеличивает пластичность на 10-15%. Увеличение длины ($d = \text{const}$) образца практически не влияет на прочность, но снижает показатели пластичности в 2-3 раза.

2. Экспериментальные данные показывают неоднозначную зависимость предела прочности и предельной пластичности от объема образцов. Установлено, что при малых значениях объемов $V \approx V_{\text{опт.}}$ (случай проволоки и тонких фольг) значение прочности стремится к вполне определенной величине, соответствующей реальной прочности материала. С увеличением объема $V \gg V_{\text{опт.}}$ зависимость прочности от объема описывается семейством пересекающихся прямых, угол наклона которых определяется размерами образцов. Получены соответствующие аналитические зависимости вида

$$\sigma_s - \sigma_{s, \text{опт.}} = \kappa (\ln V - \ln V_{\text{опт.}}).$$

3. Показано, что зависимость предела прочности от кратности образцов описывается аналогичным семейством пересекающихся прямых, угол наклона которых зависит в основном от длины образцов. Найдены минимальные и максимальные значения кратности образцов, при которых наблюдается наименьшее влияние размеров образцов на показатели механических свойств.

4. Установлены единые закономерности влияния размеров образцов на механические свойства меди и латуни в условиях холодной (20°), теплой ($200, 600^{\circ}$) и горячей (850°C) деформаций. Повышение температуры усиливает степень проявления масштабного эффекта. Показано, что сильное влияние размеров образцов на пластичность наблюдается с определенных значений объема $V_{\text{оптм.}}$ и $K_{\text{р оптм.}}$.

5. Размеры образцов влияют на момент потери стабильности пластического течения. Увеличение диаметра образца приводит к более раннему развитию локализации деформации, уменьшение текущих сопротивлений деформированию и соответствующему уменьшению интенсивности упрочнения.

Показатели механических свойств определяются величинами, характеризующими кинетику и степень развития локализации деформации: коэффициентом локализации деформации, истинными скоростями течения, коэффициентом деформационного упрочнения, локальнодеформированным объемом, которые также зависят от размера образцов. Расхождение единой зависимости $\sigma_s = f(V)$ связано с тем, что образцы с одинаковым начальным объемом (разной кратности) имеют различный локальнодеформированный объем V_d .

6. Размеры образцов пластичных металлов наибольшее влияние оказывают на показатели пластичности δ . Увеличение диаметра от 4 до 10 мм практически не влияет на величину равномерного удлинения, но повышает в 2 раза локальную деформацию в шейке образца. Увеличение длины образца от 20 до 100 мм также не изменяет величину равномерного удлинения, но резко уменьшает долю локальной пластичности. Полученные данные позволяют объяснить различную степень проявления масштабного эффекта у пластичных материалов при исследовании геометрически подобных образцов различной кратности.

Таким образом, при рассмотрении проблемы масштабного эффекта у пластичных материалов наряду с металлургическим, энергетическим, статистическим и другими факторами необходимо учитывать явление локализации пластической деформации.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЗАДАЧИ АНАЛИЗА УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ПЛАСТИН

Чирас А.А., Данюнас А.А.

Рассматривается задача анализа (определения напряженно-деформированного состояния (НДС)) изгибаемых идеально упругопластических пластин при однократном нагружении до исчерпания несущей способности. Все физические и геометрические параметры пластины считаются известными. В исследованиях принимаются допущения технической теории расчета пластин.

На основе двойственных экстремальных принципов о минимуме упругого потенциала остаточных усилий и максимуме дополнительной работы остаточных перемещений [1] строятся математические модели расчета пластин, представляющие собой двойственную пару задач нелинейного математического программирования. Для практической реализации рассматриваемых математических моделей применяется метод равновесных конечных элементов (МРКЭ). Так как существующие схемы МРКЭ не позволяют получить двойственные математические модели рассматриваемой задачи, авторам пришлось внести ряд существенных усовершенствований. К ним относятся дискретизация дифференциального уравнения равновесия в пределах элемента методом Бубнова-Галеркина и последующее преобразование с помощью формулы Грина, интегрирование условий неразрывности усилий между смежными элементами.

Предлагаемая методика без изменения может быть применена к любой другой континуальной системе.

Приводятся примеры расчета пластин.

1. Чирас А.А. Математические модели задачи анализа и оптимизации упругопластических систем. — Вильнюс: Мокслас, 1982. — 112 с.

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВЯЗКО-УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Шаблий О.Н., Гарапук Т.Р.

Построена математическая модель оптимального управления упруго-вязко-пластическим деформированием твердых тел. В качестве функционала цели принят минимум мощности приложенных внутренних и внешних тепловых источников. За функцию управления взяты их удельные мощности. Во всей области тела должны выполняться условия равновесия, физические и геометрические соотношения, а также уравнения теплопроводности. На поверхности тела имеют место определенные граничные условия. Заметим, что с помощью обобщенных функций физические соотношения записаны едиными выражениями как в упругой, так и в пластической области:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2G} \dot{S}_{ij} + \frac{1}{2\eta_e} S_{ij} + d\dot{T} + \frac{\tau_s}{\eta_p} F \frac{\partial F}{\partial S_{ij}} \bar{\epsilon}_0(F) \bar{\epsilon}_0(\Phi),$$

где $F = \frac{1}{\tau_s} \left[\frac{1}{2} \hat{A}_2 \right]^{1/2} - 1$ — функция напряжений при условии текучести Мизеса, \hat{A}_2 — вторые алгебраические инварианты тензора напряжений, $\bar{\epsilon}_0(F)$ и $\bar{\epsilon}_0(\Phi)$ — асимметричные единичные функции Хевисайда, $\Phi = \frac{\partial F}{\partial t} = \frac{\partial F}{\partial S_{ij}} \dot{S}_{ij}$ — скорость изменения функции напряжений вследствие изменения компонент напряжений во времени, которая положительна при нагружении и отрицательна при разгрузке. Из этого выражения видно, что при деформировании до предела текучести и при разгрузке тело деформируется вязко-упруго. В начальном состоянии температура тела совпадает с температурой среды. В конкретном случае это может быть задача перевода напряженного состояния тела из заданного в нулевое, причем температура в конце термообработки также должна быть равна температуре среды, т.е. это задача снятия остаточных напряжений.

Методом множителей Лагранжа задача приведена к нахождению абсолютного минимума расширенного функционала, экстремали которого дают сопряженную систему дифференциальных уравнений и выражения для оптимальных функций управления, обеспечивающих поставленную цель.

Предложено два способа решения полученной системы нелинейных дифференциальных уравнений. В каждом способе применен метод последовательных приближений, причем в каждом приближении функции, определяющие расположение зон упругого и пластического нагружения, а также разгрузки, считаются постоянными (0 или 1) и определяются из предыдущего приближения. В первом способе в каждом приближении задача сведена к вариационной, причем для напряженно-деформированного состояния применен принцип типа Кастильяно, а для температурного поля - Айнолы Л.Я. На этапе каждого приближения второго способа применен метод конечных разностей. Сходимость проверена численно.

На примере кольцевого диска продемонстрирован алгоритм снятия остаточных напряжений. В диске, после сварки в него кольцевого фланца, возникло поле остаточных напряжений и деформаций, которые определены экспериментально. По этим данным построена их аналитическая аппроксимация. Остаточные напряжения и деформации служат начальными для алгоритма их снятия.

В первом способе применен оператор Лапласа в сочетании с названными вариационными принципами для изображений. В результате этого задача приведена к решению линейных алгебраических уравнений для нахождения неизвестных коэффициентов в сочетании с нелинейным уравнением относительно параметра преобразования.

Во втором способе в каждом приближении методом конечных разностей задача сведена к системе линейных алгебраических уравнений. Исследованы режимы снятия остаточных напряжений. Отмечено, что эффективному их снятию способствует пластическое деформирование, а последнее вызывается градиентом температуры.

СПОСОБ РЕШЕНИЯ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ПРИ СИЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Шамардин А.Б.

Решение задач силового нагружения сварных металлоконструкций при исследовании развития упруго-пластических деформаций связано с необходимостью учета истории нагружения и реализации физической нелинейности процесса [1]. Для элементов конструкций, работу которых как в процессе изготовления с помощью сварки, так и при внешнем силовом нагружении можно рассматривать в рамках гипотезы плоского напряженного состояния, предлагается способ решения при следующих предпосылках:

- материал изделия и сварных швов имеет одинаковые свойства и диаграмму $\sigma_i - \epsilon_i$ упруго-пластического тела с упрочнением;

справедливы соотношения теории пластического течения и условие текучести Мизеса.

Для учета истории нагружения используется метод догружений с последовательным прослеживанием упруго-пластических деформаций, на каждом этапе которого определяются приращения деформаций

$$\begin{Bmatrix} \Delta \epsilon_{xx} \\ \Delta \epsilon_{yy} \\ \Delta \epsilon_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{1}{E^p(\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu^p(\Delta \epsilon_i^p)}{1-\nu^p(\Delta \epsilon_i^p)} & 0 \\ \frac{\nu^p(\Delta \epsilon_i^p)}{1-\nu^p(\Delta \epsilon_i^p)} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\nu^p(\Delta \epsilon_i^p)}{1-\nu^p(\Delta \epsilon_i^p)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx}^0 - \nu^p(\Delta \epsilon_i^p) \epsilon_{zz}^0 \\ \epsilon_{yy}^0 - \nu^p(\Delta \epsilon_i^p) \epsilon_{zz}^0 \\ \epsilon_{xy}^0 \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \nu^p(\Delta \epsilon_i^p) &= \nu, \text{ если } f = \sigma_i^2 - \sigma_i(\epsilon_i) < 0; \\ \nu^p(\Delta \epsilon_i^p) &= 0,5 - \frac{(0,5 - \nu) \epsilon_T(\epsilon_i)}{\Delta \epsilon_i^p + \epsilon_T(\epsilon_i)}, \text{ если } f = 0; \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$E^p(\nu) = \frac{1 - 2\nu^p(\Delta \epsilon_i^p)}{1 - 2\nu} E; \quad (3)$$

ϵ_{ij}^0 - начальные деформации, обусловленные пластическими деформациями на предыдущих этапах нагружения;

- $\Delta \varepsilon_i^p$ - интенсивность приращений пластических деформаций;
 $\varepsilon_r(\varepsilon_i)$ - величина упругой деформации к началу этапа нагружения
 с учетом упрочнения;
 $\sigma_r(\varepsilon_i)$ - величина предела текучести к началу этапа нагружения
 с учетом упрочнения;
 E - модуль упругости;
 ν - коэффициент Пуассона.

Для реализации физической нелинейности, заключенной в выражениях (1), (2), используется метод упругих приближений, где в качестве характеристики, на которой построен итерационный процесс, принимается функция $\nu^p(\Delta \varepsilon_i^p)$.

На основании выражений (1) - (3) получены соотношения, позволяющие решать рассматриваемые задачи методом конечных элементов с применением ЭВМ. Эти соотношения сводят решение задачи нелинейной пластичности к ряду последовательно решаемых линейных задач для фиктивного упругого тела с модулем упругости $E = E^p(\nu^p)$ и коэффициентом Пуассона $\nu^p(\Delta \varepsilon_i^p)$.

Указанное обстоятельство позволяет для решения упруго-пластических задач использовать соотношения метода конечных элементов теории упругости [2], в которых матрица упругих коэффициентов $[D]$ заменена ее пластическим эквивалентом-матрицей упруго-пластичности $[D^p(\nu^p)]$.

На основании разработанного способа составлена программа на алгоритмическом языке ФОРТРАН-IV, позволяющая решать задачи по определению перемещений, деформаций и напряжений в процессе силового нагружения сварных конструкций, работающих по схеме плоского напряженного состояния.

Л и т е р а т у р а

1. Махненко В.И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. К.: Наукова думка, 1976, 320 с.
2. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М., Мир, 1979, 392 с.

ПРИМЕНЕНИЕ ВАРИАЦИОННОГО ПРИНЦИПА ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА ПРОЦЕССА ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ КВАДРАТНОЙ ЖЕСТКОПЛАСТИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНЫ

Шведе А. И.

В настоящее время неизвестно точное решение задачи о динамическом нагружении жесткопластической квадратной пластины. Предыдущие исследования проведены, считая форму распределения прогибов известной (например [1]).

В предлагаемой работе вышеупомянутая задача исследована численно, решая из вариационного принципа [2] следующее вариационное неравенство итерационным алгоритмом Удзавы [3].

Рассматривается квадратная (длина стороны L , толщина h , ($h \ll L$)) свободно опертая жесткопластическая пластина, которая нагружена прямоугольным импульсом равномерно распределенного давления p длительностью τ . Тогда, работая в рамках гипотезы Кирхгофа-Лява и используя условие текучести Мизеса, скорость прогиба $\dot{w}(x_1, x_2, t)$ в течение интервала времени Δt_e , можно получить, минимизируя, функционал

$$J(\dot{w}, \Delta t_e) = \iint_{\Omega} \frac{(\dot{w} - \dot{w}^{(e-1)})^2}{2 \Delta t_e} dx_1 dx_2 + \frac{1}{4} \iint_{\Omega} \dot{\phi}(\dot{w}) / \dot{\phi}(\dot{w}_0) dx_1 dx_2 - Z \iint_{\Omega} \dot{w} dx_1 dx_2,$$

где

$$\dot{\phi}(\dot{w}) = \sqrt{\frac{2}{3} \left(\frac{\partial^2 \dot{w}}{\partial x_1^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 \dot{w}}{\partial x_2^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 \dot{w}}{\partial x_1 \partial x_2} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial^2 \dot{w}}{\partial x_1 \partial x_2} \right)^2} - \text{диссипативный потенциал,}$$

$\dot{w} = m L^2 / 4 M_0 \tau$; $Z = \rho L^2 / 4 M_0$ - безразмерная скорость прогиба и интенсивность нагрузки, $\dot{w}^{(e-1)}$ - скорость в интервале времени Δt_{e-1} , $M_0 = \sqrt{3} h^2$ - предельный изгибающий момент, m - масса на единицу площади с граничными условиями свободного опирания.

Минимизация функционала эквивалентна нахождению седловой точки лагранжиана $\mathcal{L}(\dot{w}, s_{ij}, \Delta t_e)$, где

$$\mathcal{L} = \iint_{\Omega} \frac{(\dot{w} - \dot{w}^{(e-1)})^2}{2 \Delta t_e} dx_1 dx_2 + \frac{1}{4} \iint_{\Omega} \left(S_{11} \frac{\partial^2 \dot{w}}{\partial x_1^2} + S_{22} \frac{\partial^2 \dot{w}}{\partial x_2^2} - S_{33} \left(\frac{\partial^2 \dot{w}}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \dot{w}}{\partial x_2^2} \right) + 2 S_{12} \frac{\partial^2 \dot{w}}{\partial x_1 \partial x_2} \right) dx_1 dx_2 - Z \iint_{\Omega} \dot{w} dx_1 dx_2,$$

где $\lambda = \{s_{ij} | s_{ij} s_{ij} \leq \frac{2}{3}\}$.

Применяя алгоритм Удзави, задачу можно свести к следующему двухшаговому итерационному процессу:

$$1) W^n = -\frac{dte}{4} \left(\frac{\partial^2 S_{11}}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 S_{22}}{\partial x_2^2} - \frac{\partial^2 S_{33}}{\partial x_1^2} - \frac{\partial^2 S_{33}}{\partial x_2^2} + 2 \frac{\partial^2 S_{42}}{\partial x_1 \partial x_2} \right) + 2dte + W^{n-1},$$

$$2) S_{ij}^{n+1} = P_\lambda \left(S_{ij}^n + \beta_n \frac{\partial^2 W^n}{\partial x_i \partial x_j} \right); i, j = 1, 2, S_{33}^{n+1} = P_\lambda \left(S_{33}^n - \beta_n \left[\frac{\partial^2 W^n}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 W^n}{\partial x_2^2} \right] \right),$$

где $P_\lambda(t_{ij}) = t_{ij} / \max(1, \sqrt{3/2} t_{ij} d_{ij})$,

β_n — численный параметр.

Для проведения численного решения производные аппроксимировались конечными разностями. Вычисления проводились для 1/4 части пластины, шаг разбиения $H = 0,05$.

Исследовалось поведение пластины в фазах нагружения и инерционного движения для нагрузок разных интенсивностей. На рис. I

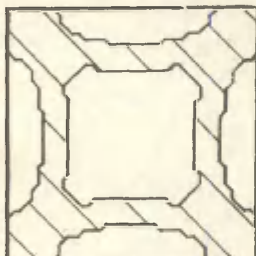


Рис. I. Расположение жестких и пластических областей

в качестве примера дано распределение жестких и пластически деформирующихся (заштриховано) областей пластины во время нагружения при $\bar{z} = 72$.

Следует отметить, что гипотезы о локализации деформаций только вдоль шарнирных линий в предлагаемом решении не выполняются.

Автор выражает искреннюю благодарность проф. В.П. Тамуху за внимание и помощь в работе.

Литература

1. Cox A., Morland L. Dynamic plastic deformations of simply-supported square plates. — J. Mech. Phys. Sol., 1959, v 7, №. 4, 229-241 p.
2. Мосолов П.П., Мясников В.П. Механика жесткопластических сред. М., 1981, 208 с.
3. Гловински Р., Лионс П., Тремольер Р. Численное исследование вариационных неравенств. М., 1979, 574 с.

ДИСКЛИНАЦИОННАЯ СТРУКТУРА И ПЛАСТИЧНОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТЁКОЛ

Шудегов В.Е., Бектышева О.Н.

Хорошо известно, что металлические стёкла (МС) в отличие от силикатных стёкол обладают не только высокой прочностью, но и достаточно хорошей пластичностью (пластическая деформация на изгиб для некоторых МС может достигать 50%). Причём вся она оказывается целиком локализованной в полосах сдвига, аналогичных тем, которые наблюдаются в кристаллах. Несмотря на достаточно большое количество экспериментальных данных по изучению пластических свойств МС, вопрос об элементарных носителях пластической деформации, а следовательно, и её механизме, до сих пор остаётся открытым. Из всего многообразия различных моделей, предложенных для описания структуры МС к настоящему времени, расчёты основных механических характеристик этих материалов удаётся получить лишь в рамках дислокационно-дисклинационной модели. Такая модель применительно к ГЦК решётке впервые была предложена Моррисом.

В нашей работе аналогичные представления получили дальнейшее развитие для ГПУ решётки. В частности, нами показана возможность аморфизации ГПУ решётки клиновыми 60-ти градусными дисклинациями разного знака. Рассчитаны радиальные функции распределения (РФР) атомов для структур с различной плотностью дисклинаций. Анализ РФР показывает, что вид этих функций сильно зависит от количества дисклинаций в решётке. В частности, когда плотность дисклинаций в системе такова, что расстояние между соседними дисклинациями составляет порядка десяти межатомных промежутков, на РФР наблюдается два максимума. При увеличении плотности дисклинаций, что равносильно уменьшению расстояния между дисклинациями, на РФР остаётся всего лишь один максимум.

Особое внимание уделяется в работе обсуждению механизма пластической деформации МС с позиций теории дисклинаций. Отмечается, что в рамках развиваемого подхода, МС может деформироваться либо за счёт движения дисклинаций (при участии дефектов дислокационного и вакансионного типа), либо путём его предварительной кристаллизации в локальных участках и последующего пробега по этим участкам лавины дислокаций.

ВЛИЯНИЕ РАСПОРА НА НЕСУЩЮЮ СПОСОБНОСТЬ ОКОНТУРЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ

Янкелевич М.А.

При работе железобетонных изгибаемых плит, оконтуренных ребрами либо примыкающих в составе перекрытий к другим конструкциям, препятствующим свободным горизонтальным смещениям контура, возникает "арочный эффект" – распор, который увеличивается по мере проявления неупругих свойств железобетона с возрастанием усилий в конструкции. Распор влияет на несущую способность, деформативность и трещиностойкость железобетонных плит.

Традиционный подход к расчету несущей способности плит, основанный на кинематическом методе предельного равновесия [1,2], в основу которого положена предпосылка о пренебрежимо малых деформациях конструкции до наступления предельного состояния, при расчете плит, работающих с распором, оказывается неправомерным. Это вызвано существенным влиянием, которое оказывают на работу сил распора прогибы, возникающие к моменту исчерпания несущей способности.

В НИИСКе [3] разработан подход к расчету напряженно-деформированного состояния и несущей способности балок и плит, работающих с распором, основанный на рассмотрении геометрии конструкции относительно физических осей ее сечений [4], а также учете податливости самой конструкции и опорного контура.

Несущая способность определяется методом предельного равновесия, исходя из схем излома, аналогичных схемам разрушения плит, работающих без распора [1,2], задаваемых с точностью до одного или нескольких параметров, определяемых вектором K . При составлении уравнений работ внешних и внутренних сил учитывается как работа предельных моментов, так и нормальных сил распора.

Параметр обобщенной предельной нагрузки q определяется путем решения экстремальной задачи

$$q = \min_{(K)} [\max_{(H)} q(A, K, H)],$$

где A – вектор заданных параметров конструкции /характеристики материалов, геометрия, параметры армирования и распределения нагрузки/, H – вектор усилий распора.

Указанная методика расчета реализована для заземленных по контуру прямоугольных плит в программе RASPOR для ЕС ЭВМ.

При расчете учитывается деформированная схема конструкции, получаемая с учетом горизонтальных смещений контура и прогиба плиты к моменту исчерпания несущей способности. Геометрия конструкции и усилия распора уточняются последовательными приближениями. Перемещения контура вычисляются от усилий распора, которые предполагаются равномерно распределенными по ширине плиты. Прогобы определяются интегрированием по участкам деформаций, вычисляемых на уровне оси расчетной схемы с учетом неупругих свойств железобетона.

В НИИСКе выполнены экспериментальные исследования опытных образцов прямоугольных плит с различными соотношениями размеров в плане, толщиной и процентами армирования. Испытания проводились для одинаковых образцов при двух вариантах защемления по контуру: с закреплением и без закрепления от горизонтальных смещений. Кроме того, испытан ряд плит оконтуренных ребрами. Результаты расчетов по программе RASPOR хорошо согласуются с данными указанных испытаний, а также опытов, описанных в литературе.

Численный анализ и экспериментальные данные показывают, что несущая способность плит, работающих в составе замкнутого перекрытия, увеличивается за счет распора в 2,5 - 3,5 раза. В отдельно стоящих сборных железобетонных подкрепленных ребрами плитах распор, воспринимаемый ребрами, увеличивает несущую способность плит на 25 - 60%.

Л и т е р а т у р а

1. Гвоздев А.А. Метод предельного равновесия в применении к расчету железобетонных конструкций. Инженерный сборник, т.У, вып. 2, М., 1949, с. 3 - 20.

2. Крылов С.М. Перераспределение усилий в статически неопределимых железобетонных конструкциях. М., Стройиздат, 1964, 168 с.

3. Янкевич М.А. К расчету железобетонных балок и плит, работающих с распором. Сб.: "Строительные конструкции", вып. 35, Будівельник, Киев, 1982, с. 74 - 79.

4. Янкевич М.А. Физическая ось железобетонных элементов. Сб.: "Строительные конструкции", вып. 19, Будівельник, Киев, 1972, с. 135 - 140.

УСТАЛОСТНАЯ ПРОЧНОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Абашидзе А.И., Абашидзе Г.А., Коссая Т.А., Ландау С.З.

1. В докладе рассматриваются вопросы, связанные с изменением прочностных характеристик железобетонных конструкций, вызванных длительным нагружением циклической нагрузкой при различных значениях коэффициента асимметрии цикла, а также различных процентах и дисперсности армирования.

2. Проведены испытания на циклическую вибрационную нагрузку обычных железобетонных балок из тяжелого и легкого бетонов, отличающихся процентом и дисперсностью армирования, а также предварительно-напряженных балок из легкого железобетона с различной степенью предварительного обжатия бетона (начальное напряжение арматуры составляло 0,4; 0,6 и 0,8 от ее нормативного сопротивления).

Испытания проводились на универсальной машине Груз-НИИЭГС УВМ-2500, позволяющей создавать различные режимы динамического нагружения, по методике ускоренных испытаний на выносливость, основанной на гипотезе линейного накопления усталостных повреждений.

3. Предельно допустимая величина суммарной ширины раскрытия трещин нормируется из условия предотвращения резонанса конструкции.

4. Падение частоты собственных колебаний обычных железобетонных балок после их испытания динамической нагрузкой составляет от 22 до 34%, увеличиваясь у слабоармированных балок, а также при уменьшении коэффициента асимметрии цикла нагрузки.

5. Падение частоты собственных колебаний предварительно-напряженных балок в процессе их динамического испытания тем сильнее, чем ниже степень предварительного обжатия бетона при прочих равных условиях.

6. Исследования выносливости железобетонных балок по наклонным сечениям показали, что схема трещинообразования и

разрушения по наклонным сечениям одинакова как при статическом приложении нагрузок, так и при многократно повторном, а поэтому при разработке метода расчета могут быть приняты те же предпосылки в отношении схемы работы конструкции.

На основании этого для расчета выносливости наклонных сечений была предложена формула СНиП II-2I-75 для расчета статической прочности на действие поперечной силы, но с введением к прочностным характеристикам бетона и арматуры коэффициентов условия их работы при многократно-повторных нагружениях, которые были определены в процессе экспериментов.

Полученные результаты позволили разработать рекомендации по расчету выносливости наклонных сечений, что обеспечивает экономический эффект и уточняет существующую методику расчета, принятую в действующем СНиП.

ОПТИМИЗАЦИЯ ИМПУЛЬСВНО НАГРУЖЕННЫХ АРМИРОВАННЫХ

БАЛОК ИЗ ЖЕСТКО-ПЛАСТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Аунин У.Х.

Рассматривается задача оптимального проектирования армированной балки, которая подвержена действию начального поперечного импульса. Применяется модель жестко-пластического тела.

Считая общую массу балки фиксированной, решаем задачу определения геометрических характеристик арматуры, при которых остаточный прогиб в центре балки является минимальным. Рассматриваются различные способы армирования и закрепления балки. Дифференциальные уравнения движения интегрируются вначале в точной постановке (применяя метод квазимодалных движений), а затем с помощью метода модальных движений. Реальное и "модальное" поле скоростей связаны 1) путем приравнивания начальных кинетических энергий, 2) по способу Мартин-Саймондса.

Проведены расчеты на ЭВМ и подобраны оптимальные параметры для армирующего слоя. Обнаружено, что оптимальные значения параметров, определенные по точной и по приближенной постановке, практически совпадают.

О СООТНОШЕНИЯХ ДЛЯ ОБОБЩЕННЫХ УСИЛИЙ В ЗАДАЧАХ ПРИСПОСОБЛЯЕМОСТИ СТЕРЖНЕЙ, ПЛАСТИНОК И ОБОЛОЧЕК

Алявдин П.В.

Формулируются задачи анализа и оптимизации предельного равновесия призматического стержня из идеально упругопластического материала при повторно-переменном нагружении. Стержень рассматривается как трех- или одномерное тело. Нагрузка на него, содержащая в общем случае сложной деформации 6 компонент, относится к некоторому классу сил, определяемому системой неравенств. Подробно изучаются двусторонние ограничения компонент снизу и сверху. Аналогично ставятся задачи определения предельных соотношений и построения поверхностей взаимодействия для обобщенных усилий в пластинках и оболочках с использованием соответствующих гипотез технической теории. Для материалов, различно сопротивляющихся растяжению и сжатию, принимается условие текучести Баландина-Гениева, которое для одинаково сопротивляющихся растяжению и сжатию материалов преобразовывается в условие Мизеса. Учитывается неопределенность параметров нагрузки и пределов текучести, подчиняющихся случайному закону с равномерным распределением. Используются дифференциальные уравнения равновесия тела и краевые условия для них.

Приспособляемость конструкции анализируется в статической и получаемой из нее с помощью теории двойственности кинематической постановке. Математической моделью задачи оказывается проблема теории оптимального управления для систем с частными производными или бесконечномерная задача математического программирования с линейными ограничениями и функционалом и с нелинейным квадратичным условием текучести. Показывается их связь с минимаксными задачами равномерного чебышевского приближения.

Размерность вектора переменных управления сокращается с помощью перехода к экстремальным напряжениям как функции внешних нагрузок. Однако при этом увеличивается количество ограничений, существенно зависящее от размерности вектора напряжений.

Предлагаются различные упрощенные варианты постановки: ли-
неаризация нелинейных ограничений, исключение координаты вдоль
оси стержня, отбрасывание дифференциальных уравнений равно-
весия. В последнем случае используются методы вариационного
исчисления для решения задачи приспособляемости сечении с
учетом нормальных и касательных напряжений и методы бесконе-
чномерного линейного программирования в линейризованной задаче
или при учете только нормальных напряжений. Для режима знако-
переменной текучести решения находятся из систем нелинейных
алгебраических уравнений. Для прогрессирующего разрушения они
получаются в квадратурах. Эти зависимости обобщают некоторые
известные ранее соотношения между усилиями в стержнях, плас-
тинках и оболочках для однократного или повторно-переменного
их нагружения [1, 2].

Рассматриваются также дискретные модели приспособляемости
элементов как задачи соответственно нелинейного выпуклого,
геометрического и линейного программирования, при этом с целью
исключения неустойчивости решения рекомендуется использовать
минимаксную постановку проблемы.

Л и т е р а т у р а

1. Ржаницын А.Р. Расчет сооружений с учетом пластических
свойств материалов. Изд. 2-е. — М.: Госстройиздат, 1954, 288 с.

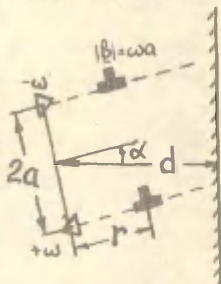
2. Гохфельд Д.А., Чернявский О.Ф. Несущая способность
конструкций при повторных нагружениях. — М.: Машиностроение,
1979, 263 с.

ЗАРОЖДЕНИЕ РОТАЦИОННОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ В ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ

Бирковский А.А., Владимиров В.И., Романов А.Е.

Одним из проявлений коллективных эффектов в ансамбле ди-
сиплаций является образование полос переориентации /сброса/.
Распространение таких полос описывается как движение двух-
осного диполя клиновых частичных дисклинаций [1]. Зародышем
полосы может служить одноосный дисклинационный диполь. Энер-

гии дисклинационных диполей сильно зависят от их расположения относительно свободной поверхности материала. Значит, может существовать сильная зависимость условий зарождения и перемещения полос переориентации от расстояния до поверхности.



В данной работе рассматриваются упругие свойства дисклинационных диполей в расщепленной конфигурации, которые расположены в изотропном полупространстве и имеют произвольную ориентацию относительно свободной поверхности/см.рисунок/. Расщепленная конфигурация является промежу-

точной при формировании полосы переориентации из зародыша. В предельных случаях выбранная конфигурация позволяет изучать свойства одноосного диполя / $\epsilon = 0$ / или двухосного /при выводе дислокаций на поверхность/. Последний случай был исследован ранее в [2].

Основным результатом, полученным в работе, является точное аналитическое выражение для собственной упругой энергии диполя в расщепленной конфигурации. Соответствующие формулы здесь не приводятся в силу своей громоздкости. В частном случае одноосного диполя эта энергия равна

$$W = D\omega\alpha^2 \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{4a^2}{r_0^2} \frac{d^2 - \alpha^2 \sin^2 \alpha}{d^4 + \alpha^4 \cos^4 \alpha} \right) + \frac{\alpha^2}{2} \frac{d^2 - \alpha^2 \cos^2 \alpha}{(d^4 + \alpha^4 \cos^2 \alpha)^2} - 1 \right], \quad (1)$$

где $D = G/2\pi(1-\nu)$, G и ν - упругие модули среды, ω - мощность дисклинаций, а смысл параметров d , a и α ясен из рисунка; r_0 - радиус ядра дислокаций, входящих в одноосный диполь. На больших расстояниях от поверхности (1) дает

$$W \approx D\omega\alpha^2 \left[\ln \frac{2a}{r_0} - 1 - \frac{\alpha^4}{d^4} \cdot \frac{3+2\cos 2\alpha}{4} \right]. \quad (2)$$

При сравнении энергий одноосного и двухосного диполя [2] обнаружено, что вблизи поверхности двухосная конфигурация

энергетически выгоднее. Существует критическое расстояние, начиная с которого энергетически более выгодно зарождение одноосного диполя с последующим расщеплением на двухосный и дислокации.

Полученные в данной работе результаты позволяют рассчитывать критические напряжение и размер расщепления в зависимости от глубины залегания исходного одноосного диполя и его ориентации относительно поверхности.

Оценки подтверждают возможность реализации предложенного механизма при наличии сильных концентраторов напряжений в приповерхностных слоях.

1. Владимиров В.И., Романов А.Е. ФТТ, 1978, т.20, 3114.

2. Romanov A.E. Phys.Stat.Sol. (a), 1981, V.63,383.

КРИТЕРИЙ РАЗВИТОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ВЕРШИНЕ ТРЕЩИНЫ

Ботвина Л.Р.

Оценка характеристик трещиностойкости при различных видах нагружения связана с определением условий, обеспечивающих реализацию плоскодеформированного напряженного состояния. Между тем ощущается необходимость в критерии, позволяющем разграничивать области упругого и пластического роста трещины, отличающиеся различными микромеханизмами процесса разрушения и различными значениями трещиностойкости. Это особенно важно при описании процесса длительного роста трещины при циклическом нагружении, коррозионном растрескивании или в условиях ползучести.

В качестве такого критерия предлагается использовать коэффициент интенсивности напряжений $K_{\partial\phi}$, характеризующий достижение условий развитой пластической деформации в вершине трещины и определяемый по пределу текучести в данных условиях нагружения и длине очаговой трещины.

Достижение $K_{\partial\phi}$ при любых условиях деформирования резко меняет картину разрушения. При $K_{\max} < K_{\partial\phi}$ трещиностойкость мала, развитие трещины происходит в условиях плоской деформации, наблю-

дается либо хрупкое разрушение, либо сдвиговое, связанное с пластической деформацией, локализованной в одной из плоскостей скольжения (ламинарное скольжение). При $K_{max} > K_{du}$ трещиностойкость повышается, скольжение в устье трещины развивается по многим плоскостям (ламинарность скольжения нарушается), вследствие чего развитие трещины происходит при смешанном напряженном состоянии и характеризуется вязким микрорельефом.

Изменение условий развития трещины определяется структурными изменениями в вершине трещины и степенью повреждаемости материала. Естественно предположить, что степенные законы изменения скорости развития трещины в зависимости от коэффициента интенсивности напряжений определяются степенными законами изменения повреждаемости материала ω на стадии его пластического деформирования, предшествующего развитию трещины.

Поскольку достижение K_{du} резко изменяет механизмы развития трещины и характеристики материала, полезным критерием при оценке или прогнозировании его работоспособности является отношение K / K_{du} (ω / ω_{du}), определяющее, в какой области, упругой или пластической, наблюдается рост трещины.

Анализ микромеханизмов пластического деформирования и разрушения при различных видах нагружения подтверждает целесообразность использования критериев K_{du} и K / K_{du} при оценке работоспособности материала и прогнозировании его свойств.

УДАРНОЕ НАГРУЖЕНИЕ ПОДКРЕПЛЕННЫХ ОБОЛОЧЕК С УЧЕТОМ МЕСТНЫХ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ

Брынза А.А., Островерхов Н.П.

В работе проведено исследование процесса ударного нагружения тонкостенной конструкции типа пологой подкрепленной оболочки массивными телами остроугольной формы с учетом их местных пластических деформаций.

Предложенная авторами методика расчета тонкостенных конструкций на ударное нагружение состоит из трех частей : устанавливаются закономерности упругопластического контактного смятия остроугольных тел, определяются перемещения подкрепленной оболочки под действием локальных нагрузок, а далее, на основании использования теории поперечного удара Тимошенко, находится общее решение задачи.

В первой части рассматривается контактная задача сжатия острия упругого и упругопластического тела плоским штампом. Получены приближенные аналитические зависимости величины контактного упругопластического смятия острия клина, конуса и пирамиды от сжимающей силы $\alpha(F)$. Показано, что с уменьшением угла острия величина пластического смятия значительно превосходит упругую составляющую.

Во второй исследуется напряженнодеформированное состояние пологой подкрепленной оболочки при действии локальных нагрузок. Жесткостные характеристики ребер и локальная нагрузка вводятся в разрешающие уравнения состояния с помощью дельта-функции Дирака. В работе учитываются жесткости ребер на растяжение-сжатие, изгиб и кручение, а также эксцентричность крепления их к обшивке и дискретность размещения.

Использование аппарата обобщенных функций и сплайнов позволяет существенно упростить алгоритм решения. Для цилиндрической оболочки, подкрепленной регулярным продольным и нерегулярным поперечным набором ребер, найдено аналитическое решение.

В уравнении теории поперечного удара Тимошенко сла-

гаемое, учитывающее местное упругое смятие по Герцу, заменено функциональной зависимостью контактного смятия $\propto (F)$, полученной для упругопластического остроугольного тела, а перемещение конструкции в зоне удара определяется из решения для подкрепленной оболочки нагруженной локальной нагрузкой. Алгоритм решения уравнения Тимошенко обобщен на случай упруго-пластического удара.

В качестве примера приводится решение задачи об ударном нагружении подкрепленной цилиндрической оболочки упруго-пластическим телом остроугольной формы. Показано, что учет местных пластических деформаций оказывают существенное влияние на характер процесса удара.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ИЗ ТРУБ

Будин Е.М., Снитко А.Н.

Упруго-пластические устройства (УПУ) предназначены для ограничения максимальных усилий (ускорений), передающихся на движущееся тело со стороны основания, и поглощения кинетической энергии движущегося тела. При поглощении энергии удара УПУ ограничивают передающееся на тело усилие до величины, равной значению усилия сопротивления УПУ при пластической деформации вне зависимости от закона изменения внешней нагрузки.

В случае одномассовой механической системы с одной степенью свободы требуемые значения усилия сопротивления деформированию S_{pl} и деформации УПУ Δ определяются из решения дифференциального уравнения движения

$$m\ddot{\Delta} + S(\Delta) = F(t), \quad (I)$$

где m - масса тела ; $S(\Delta)$ - нелинейная характеристика УПУ;
 $F(t)$ - функция, определяющая силовое или кинематическое воздействие.

При составлении уравнений движения тела используется теорема об изменении кинетической энергии в интегральной форме

$$E_2 - E_1 = \sum W_{12}, \quad (2)$$

где E_1 и E_2 - кинетическая энергия в начале и в конце удара, $E_1 = m v_0^2 / 2$, $E_2 = 0$; v_0 - скорость тела в начале удара; $\sum W_{12}$ - сумма работ заданных сил и реакций связей на перемещении тела. Принцип действия некоторых УПУ основан на пластическом деформировании при раздаче трубы коническим дорном. Усилие сопротивления деформированию таких УПУ определяется на основе теории пластического деформирования металлов [1], [2] исходя из объемности напряженного состояния, возникновения и перемещения очага деформации по мере продвижения дорна при раздаче УПУ. Для отыскания поля напряжений в очаге деформации в качестве исходных используются уравнения равновесия выделенных из очага деформации элементов и уравнения пластичности, что позволяет решить задачу в замкнутом виде.

При составлении уравнений равновесия и пластичности очаг деформации делится на следующие участки:

- участок свободного изгиба трубы без трения;
- участок контакта с дорном (раздача трубы с трением);
- участок изгиба (раздачи) трубы без трения.

В пределах первого участка материал УПУ находится в условиях плоского напряженного состояния и условие пластичности для него имеет вид

$$\sigma_\theta = \sigma_y, \quad (3)$$

где σ_θ - тангенциальное напряжение ($\sigma_\theta > \sigma_y$);
 σ_y - предел текучести материала УПУ с учетом упрочне-

ния и скорости деформации; σ_r — меридиональное напряжение.

На втором участке очага деформации напряженное состояние материала является объемным и условие пластичности имеет вид

$$\sigma_\theta - \sigma_z = \sigma_y, \quad (4)$$

где σ_z — нормальное (сжимающее) напряжение, перпендикулярное к срединной поверхности элемента.

Для третьего участка принимается условие пластичности (3), поскольку $\sigma_r > 0$, $\sigma_\theta > 0$ и $\sigma_z = 0$.

В результате интегрирования дифференциальных уравнений равновесия элементов УПУ в пределах каждого участка с использованием условий пластичности (3) и (4) проведен анализ максимальных меридиональных напряжений при раздаче трубы и получена формула для определения усилия сопротивления деформированию при установившемся процессе раздачи

$$S_{pl} = 2\pi R_m t \sigma_{rmax}, \quad (5)$$

где R_m — средний радиус трубы после раздачи;

t — толщина стенки; σ_{rmax} — меридиональное напряжение в цилиндрической части трубы радиуса R_m .

Упрочнение материала и уменьшение толщины трубы учитывается в соответствии с рекомендациями [1].

Разработанная методика позволяет произвести расчет усилия сопротивления деформированию S_{pl} с достаточно малой погрешностью (до 10% к эксперименту). Для определения усилия S_{pl} в зависимости от свойств материала и геометрических параметров УПУ с помощью ЭВМ построены соответствующие графики, удобные для использования в инженерной практике.

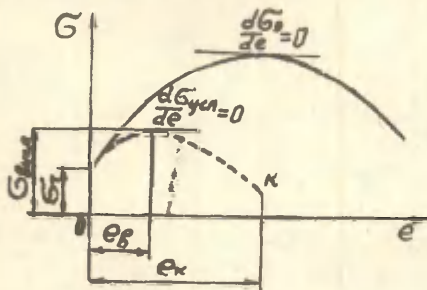
Литература

1. Губкин С.И. и др. Основы теории обработки металлов давлением. Под ред. Острожева М.В., М., Машгиз, 1959.
2. Толоконников Л.А. Механика деформируемого твердого тела. М., Высшая школа, 1979.

ПЛАСТИЧНОСТЬ И ПРОЧНОСТЬ МАТЕРИАЛА КОНСТРУКЦИИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ

Быков В.А.

1. В проектно технологических решениях подразумевается пластичность материала конструкций. Благодаря пластичности конструкции приспособляются к эксплуатационным перегрузкам. Образовавшаяся в крайнем случае остаточная деформация не исключает исправления конструкции.
2. Экспериментальные зависимости между эквивалентными величинами напряжения и пластической деформации для материалов на основе железа, меди, алюминия, титана подтверждают справедливость критериев пластичности при разных напряженных состояниях .
3. Пластическая деформация упрочняющегося материала устойчиво развивается с ростом сопротивления деформированию. Но при пластическом растяжении сужение может оказаться эффективнее упрочнения и деформация становится неустойчивой. При неизменности или увеличении сечения тела пластическая деформация становится неустойчивой с разупрочнением материала. На этой стадии деформация сосредоточивается в ограниченной области тела, предопределяя разрушение. Причины раннего разупрочнения создают угрозу хрупкого разрушения .
4. Зависимость между эквивалентным напряжением и пластической деформацией представляется восходящим и нисходящим участками (рис. I) ; первый из них свиде -



тельствует об устойчивости процесса. Условие $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = 0$ соответствует началу разупрочнения материала и потере устойчивости пластической деформации .

В частном случае осевого растяжения встречается более ранняя форма потери устойчивости пластической деформации при условии $\frac{d\sigma_{\text{усл}}}{d\epsilon} = 0$ (см. пунктирную линию на рис.1).

5. Дефекты упрочняющегося материала не исключают развитие пластической деформации. Материалы с повышенным дефекто-насыщением, например, металл от отливок, деформируется пластически при большом запасе упрочнения, в частности, при значительной разности σ_s и σ_T . Совершенствование выплавки металла, обработка давлением, термообработка снижают дефектонасыщение, способствуя пластичности. Высокопрочные материалы со свойственной им слабой упрочняемостью обладают пластичностью при условии низкого дефектонасыщения.
6. Расчеты прочности по макронапряжению сплошной среды предупреждают остаточную деформацию конструкции от эксплуатационной нагрузки. Но для предотвращения разрушения в макроупругой стадии расчет по подобной методике не оказывается удовлетворительным.
7. Эффективным средством устранения склонности материала к хрупкому разрушению служит сокращение дефектонасыщения путем совершенствования выплавки, обработки давлением, термообработки.

УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ СТАЛИ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО ЗНАКОПЕРЕМЕННОГО НАГРУЖЕНИЯ (Р-Мопыты)

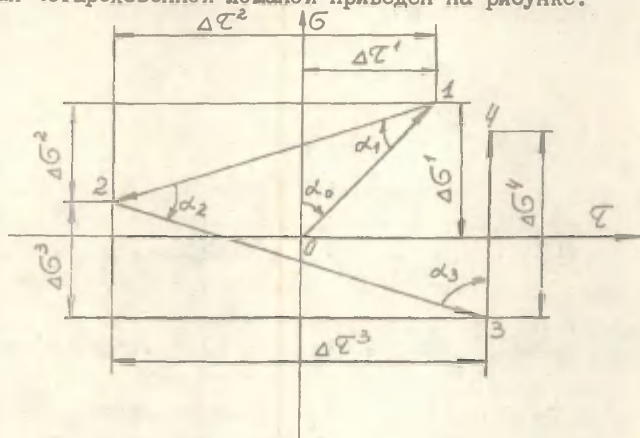
Вавакин А.С., Кулиев Р.М.

Приводятся результаты экспериментального исследования упругопластического деформирования стали 12ХНЗА при нормальной температуре в условиях сложного знакопеременного нагружения.

Испытания проводились на тонкостенных трубчатых образцах на испытательной системе Инстрон-1275, позволяющей производить нагружение образцов осевой силой крутящим мо-

ментом и внутренним давлением. Диаметр рабочей части образцов $D \approx 50\text{мм}$; толщина стенки $\delta \approx 1\text{мм}$; длина рабочей части $l \approx 100\text{мм}$.

Нагружение образцов осуществлялось крутящим моментом и осевой силой; траектория нагружения представляла собой в плоскости осевое напряжение - сдвиговое напряжение ломаную линию с прямолинейными звеньями. Общий вид программы для случая четырехзвенной ломаной приведен на рисунке.



Углы излома траектории нагружения в т. 1, 2, 3 выбирались такими, чтобы при нагружении после точки излома вначале происходила разгрузка, а затем пластическое деформирование до очередной точки излома, здесь $\Delta\sigma^i$ и $\Delta\tau^i$ - приращения осевого и сдвигового напряжений на i звене ($i = 1, 2, 3, 4$).

В процессе испытаний регистрировались во времени осевая сила, крутящий момент, осевая, окружная и угловая компоненты деформации.

Проведено две серии экспериментов: первая на исходных образцах, вторая на образцах, которые предварительно подвергались испытанию на сложное нагружение по траекториям в виде двухзвенных ломаных в плоскости осевое напряжение - окружное напряжение.

Полученные результаты могут быть использованы для построения материальных функций для описания упругопластического деформирования материала в условиях сложного знакопеременного нагружения по типу, предложенному В.В.Москвитиным.

ВЕРОЯТНОСТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НАГРУЗКИ В УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОЙ ЗАДАЧЕ ОБ УСТОЙЧИВОСТИ СЖАТОЙ ПЛАСТИНЫ

Индеекки А.В.

При установлении критических нагрузок на пластину исследуют формы равновесия, бесконечно близкие к первоначальному состоянию, и считают, что дополнительные напряжения в срединной поверхности, появляющиеся при выпучивании, малы по сравнению с изгибными напряжениями.

Обычно для решения бифуркационных задач используется энергетический метод [1]. Получаемые решения в упругой области справедливы при условии, что приведенные напряжения σ в любой точке пластины не превышают предела пропорциональности, т.е.

$$\sigma = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau^2} \leq \sigma_{лц}^0. \quad (1)$$

В силу операционного определения предела пропорциональности значения его имеют статистическое распределение минимума с функцией распределения [2]

$$F(\sigma) = 1 - \exp\left(-\exp \pi \frac{\sigma_{лц} - \sigma_{лц}^0}{\sigma_{лц} \sqrt{\sigma}}\right), \quad (2)$$

где $\sigma_{лц}$ - стандарт распределения.

Следовательно, упругая область отделена от упруго-пластической

тической некоторой пограничной областью, границы которой зависят от параметров статистического распределения предела текучести.

При исследовании устойчивости пластины за пределами упругости критические напряжения в упруго-пластической области могут быть выражены через критические напряжения в упругой области при помощи поправочного коэффициента η , зависящего от отношения секущего, касательного и приведенного модуля к модулю Цига.

Параметры, определяющие значения η для конструктивных степеней в области между пределами пропорциональности и текучести, нелинейно зависят от уровня напряжений σ и отношения ширины пластины к толщине. За верхний предел критических напряжений принимается предел текучести.

Однако предел текучести подчинен закону распределения, аналогичному (2).

Учет статистической природы напряжений $\sigma_{\text{нч}}$ и $\sigma_{\text{т}}$ дает возможность, используя функцию выживания, соответствующую статистике (2), решить задачу о надежности работы скатой пластины в упруго-пластической области и в ряде случаев вскрыть резервы несущей способности элементов конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем, М, "Наука", 1967.
2. Н. Хастингс, Д.Пикок. Справочник по статистическим распределениям, М, "Статистика", 1980.

МЕХАНИКА ЗЕРНИСТЫХ СРЕД, ЗАДАЧИ ПЛАСТИЧНОСТИ

Кандауров И.И.

На основе вероятностного подхода автор данного доклада в 1959 году построил теорию дискретного распределения давления в зерни-

тых средах (1). Дальнейшее развитие эта теория получила в его книге (2), опубликованной в 1966 г. И.И.Кандауров рассматривал распределение давления в такой среде как вероятностный процесс, реализуемый на зернистой структуре. При этом все зернистые среды были разделены на две группы - безраспорные и распорные по признаку отсутствия или наличия клинового эффекта по отношению к направлению действия внешней нагрузки. В результате им были получены для безраспорной среды следующие формулы распределения давления от сосредоточенной вертикальной силы P

а) в плоской задаче: $\bar{\sigma}_z = \rho \sqrt{\frac{\alpha}{2\pi z}} \exp\left(-\frac{\alpha}{2z} x^2\right);$

$$\tau_{xz} = \frac{x}{2z} \bar{\sigma}_z; \quad \sigma_x = \left(\frac{2x^2}{z} - 1\right) \frac{\bar{\sigma}_z}{4\alpha z};$$

б) в пространственной задаче: $\bar{\sigma}_z = \frac{P}{2\pi z^2} \sqrt{\alpha x \alpha y} \exp\left(-\frac{\alpha x x^2 \alpha y y^2}{2z}\right)$

$$\tau_{xz} = \frac{x}{2z} \bar{\sigma}_z; \quad \tau_{yz} = \frac{y}{2z} \bar{\sigma}_z; \quad \tau_{xy} = \frac{xy}{4z^2} \bar{\sigma}_z;$$

$$\sigma_x = \left(\frac{\alpha x x^2}{z} - 1\right) \frac{\bar{\sigma}_z}{4\alpha x z}; \quad \sigma_y = \left(\frac{\alpha y y^2}{z} - 1\right) \frac{\bar{\sigma}_z}{4\alpha y z};$$

При $\alpha x = \alpha y$ эти формулы преобразуются $\bar{\sigma}_z = \frac{P\alpha}{2\pi z^2} \exp\left(-\frac{\alpha z^2}{2z}\right);$ где $z^2 = x^2 + y^2$

Для распорной среды И.И.Кандауровым были получены следующие формулы для средних напряжений от вертикальной сосредоточенной силы P .

а) плоская задача: $\bar{\sigma}_z = \frac{P}{2\sqrt{2\pi\nu}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\nu z^2}\right);$

$$\tau_{xz} = \frac{x}{z} \bar{\sigma}_z; \quad \sigma_x = \frac{x^2}{z^2} \bar{\sigma}_z;$$

б) пространственная задача: $\bar{\sigma}_z = \frac{P}{2\pi\nu z^2} \exp\left(-\frac{z^2}{2\nu z^2}\right);$

$$\tau_{xz} = \frac{x}{z} \bar{\sigma}_z; \quad \tau_{yz} = \frac{y}{z} \bar{\sigma}_z; \quad \tau_{xy} = \frac{xy}{z^2} \bar{\sigma}_z; \quad \sigma_x = \frac{x^2}{z^2} \bar{\sigma}_z; \quad \sigma_y = \frac{y^2}{z^2} \bar{\sigma}_z$$

(в цилиндрических координатах $\tau_{rz} = \frac{z}{r} \bar{\sigma}_z; \quad \sigma_z = \frac{z^2}{r^2} \bar{\sigma}_z$)

Для произвольной вертикальной нагрузки берутся соответствующие интегралы по площади распределения нагрузки. Кроме того, для кас-

фальных напряжений для распорной среды Р.А.Муллером (1962г.) предложены следующие формулы

$$\tau_{xz} = -\nu z \frac{\partial \bar{\sigma}_z}{\partial x}; \quad \tau_{yz} = -\nu z \frac{\partial \bar{\sigma}_z}{\partial y}; \quad \tau_{xy} = \nu^2 z \frac{\partial^2 \bar{\sigma}_z}{\partial x \partial y};$$

Аналогичные формулы для касательных напряжений в безраспорной зернистой среде от произвольной нагрузки предложены И.И.Кандауровым (1966г.):

$$\tau_{xz} = -\frac{1}{2\alpha} \frac{\partial \bar{\sigma}_z}{\partial x}; \quad \tau_{yz} = -\frac{1}{2\alpha} \frac{\partial \bar{\sigma}_z}{\partial y}; \quad \tau_{xy} = \frac{1}{4\alpha^2} \frac{\partial^2 \bar{\sigma}_z}{\partial x \partial y};$$

Используя приведенные формулы, можно идти по пути отыскания областей, находящихся в предельном или близком к предельному состоянию. Проиллюстрируем это на примере безраспорной зернистой среды, для которой плоскости скольжения перпендикулярны направлению $\bar{\sigma}_z$. Функция, определяющая предельное $F(x, z) = \frac{\bar{\sigma}_z}{\bar{\sigma}_x} = -\frac{2\alpha \bar{\sigma}_z}{\nu z}$. Для отыскания значений x и z , в которых F имеет максимальное значение $\frac{\partial F}{\partial x} = 0$; $\frac{\partial F}{\partial z} = 0$; Эти уравнения преобразуются к виду:

$$\bar{\sigma}_z \frac{\partial^2 \bar{\sigma}_z}{\partial x^2} - \left(\frac{\partial \bar{\sigma}_z}{\partial x} \right)^2 = 0; \quad \bar{\sigma}_z \frac{\partial^2 \bar{\sigma}_z}{\partial x \partial z} - \frac{\partial^2 \bar{\sigma}_z}{\partial x \partial z} = 0;$$

Литература: 1. Кандауров И.И. "Теория дискретного распределения напряжений ..." ВАТТ, 1959; 2. Кандауров И.И. "Механика зернистых сред и ее применение в строительстве", Стройиздат, Л., 1966.

ФРАКТОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЯЗКОГО ИНТЕРКРИСТАЛЛИТНОГО РАЗРУШЕНИЯ КРУПНОЗЕРНИСТОГО НИКЕЛЯ ПРИ РАЗВИТИИ ТРЕЩИНЫ УСТАЛОСТИ

Крамаренко И.В., Красовский А.Я., Лихачев В.А.

Межзеренное разрушение при развитии трещины усталости /РТУ/ является одним из часто встречающихся на практике механизмов. Он характерен при тех или иных условиях для широкого

класса материалов, однако еще нельзя сказать, что он изучен достаточно детально. Трактовка этого механизма, как мгновенного разрушения вследствие достижения напряжениями критического значения, не всегда является справедливой, так как не учитывает влияния на разрушение процесса постепенного накопления пластической деформации /ЦД/ при циклическом нагружении.

В докладе представлены результаты экспериментального исследования межзеренного разрушения поликристаллического никеля чистоты 99,99% с размером зерен от 2 до 12 мкм, испытанного на внецентренное циклическое растяжение. Испытания компактных СТ образцов проводили с частотой нагружения 44 Гц коэффициентом асимметрии цикла $R = 0,1$ при комнатной температуре на воздухе. Длину трещины, соответствующую определенному количеству циклов нагружения, фиксировали на боковой поверхности образца с помощью оптического микроскопа.

Построена кинетическая диаграмма усталостного разрушения /КДУР/. Проведена оценка вклада мод K_I и K_{II} при РТУ по границам зерен.

Посредством растровой и трансмиссионной /метод репликации/ электронной микроскопии исследовался микромеханизм РТУ по границам зерен с образованием вязких бороздок усталости на фоне кажущегося макроруптного зернограницного разрушения. Показано, что бороздка усталости образуется в момент разрушения после достижения определенного уровня ЦД при исчерпании локальной прочности материала. Продемонстрирован блочный характер бороздок усталости, что в некотором смысле подтверждает модель РТУ, предложенную Томкинсом. В интервале 10^{-4} – 10^{-3} мм/цикл выявлена удовлетворительная корреляция между макро- и микроскоростью РТУ, определяемых соответственно на боковой поверхности образца и по шагу бороздок усталости. Тенденция к образованию блоков бороздок возрастает с увеличением размаха коэффициента интенсивности напряжений ΔK и скорости РТУ. Блочная структура особенно характерна для второй половины линейного участка КДУР и перехода его в третий.

Показано, что при циклическом макрохрупком интеркристаллитном разрушении определяющую роль играет накопление ПД, которая приводит к выходу на границу зерен полос скольжения и образованию ослабляющих ее ступенек несоответствия. Величина ПД возрастает с увеличением количества циклов нагружения и величиной нагрузки, однако склонность к макрохрупкому межзеренному разрушению с увеличением нагрузки снижается. Благоприятным фактором его реализации является скорее увеличение циклической наработки на определенном уровне нагрузки, чем повышение последней.

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЖЕСТКО-ПЛАСТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ

Леллеп Я.А.

Представляется обзор наиболее распространенных аналитических методов решения задач оптимального проектирования пластических тонкостенных балок, пластин и оболочек. Работа состоит из двух частей.

В первой части рассматриваются геометрически линейные элементы конструкций. Обсуждаются различные постановки задач оптимизации и делаются попытки классифицировать известные работы на основе методов решения сформулированных задач. Реферируется метод Дракера-Шилда, основанный на теореме о постоянстве удельной энергии. При идеально трехслойной конструкции и отсутствии массовых сил условие Дракера-Шилда имеет форму

$$\frac{D}{h} = \text{const} , \quad (1)$$

где D - диссипация внутренней энергии, а h - толщина несущих слоев. Условие Дракера-Шилда (1) обобщается на более сложные конструкции и более сложные виды нагружения.

Другой подход к задачам оптимального проектирования был разработан Марсалом и Прагером путем введения фиктивного поля деформаций для ассоциированной нелинейно-упругой кон-

струкции. Применяя для последней принцип минимума дополнительной энергии, Марсал, Прагер и Шилд получили условие оптимальности в виде

$$q_k = G \psi(Q_s). \quad (2)$$

Здесь q_k - кинематически возможное поле скоростей деформаций, Q_s - статически допустимое поле напряжений, ψ - т.н. удельная цена, а G - обобщенный градиент-оператор.

Условия оптимальности типа (1) и (2) являются, по-видимому, самыми распространенными условиями, которые применимы для решения широкого круга задач. Кроме этих методов, можно для решения частных задач применить как вариационные методы, так и принцип максимума Л.С.Понтрягина. Методы нелинейного программирования и динамического программирования в данном обзоре не рассматриваются, поскольку они применяются прежде всего для численного анализа. По этой же причине в данной работе не освещаются методы конечных элементов.

Во второй части рассматриваются проблемы оптимального проектирования геометрически нелинейных балок и цилиндрических оболочек. Обсуждаются различные подходы к задачам оптимизации жестко-пластических конструкций с учетом умеренно больших прогибов (перемещения могут быть до порядка толщины оболочки). В частности, приводятся решения задач оптимизации при заданной форме деформирования. Реферируются некоторые минимаксные задачи. Приводится формулировка параметрической задачи оптимизации. Необходимые условия можно в таком случае вывести вариационными методами теории оптимального управления. Общий анализ иллюстрируется конкретными примерами.

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ НЕОДНОРОДНЫХ ПЛАСТИЧЕСКИХ БАЛОК С УЧЕТОМ БОЛЬШИХ ПРОГИБОВ

Леллеп Я.А., Маяк Ю.П.

Исследуются проблемы оптимального проектирования кусочно-неоднородных жёстко-пластических балок с учетом геометрической нелинейности. Ограничиваются случаем параметрической оптимизации и с единой точки зрения рассматриваются балки кусочно-постоянной толщины и балки, укрепленные (армированные) слоями более жесткого материала. При формулировке задачи оптимизации считаются заданными как физические параметры, так и число слоев арматуры (в случае армированной балки, и число различных значений высоты или толщины (в случае однородного материала).

Рассматриваются шарнирно закрепленные и жестко заделанные балки, которые нагружены распределенной поперечной нагрузкой и осевым растяжением. Учитываются умеренно большие прогибы, т.е. перемещения, которые соизмеримы с толщиной балки. Применяется теория пластичности типа деформации и ассоциированный закон деформирования. Сформулированная задача сводится к задаче оптимального управления. Необходимые условия оптимальности выводятся с помощью вариационных методов. Полученная нелинейная система уравнений решается численно методом Ньютона.

Приводятся численные результаты для балок кусочно-постоянной толщины и для балок, армированных двумя слоями. Оценивается экономия найденных проектов.

ВЛИЯНИЕ ИСХОДНОЙ СТРУКТУРЫ НА ПЛАСТИЧНОСТЬ
И УПРОЧНЕНИЕ ГЦК МЕТАЛЛОВ ПРИ
ВЫСОКОСКОРОСТНОМ НАГРУЖЕНИИ

Куров И.Е., Брагов А.М., Шахалова Г.И., Евплов А.И.

1. Получены динамические диаграммы деформирования при скоростях деформации 10^3 с^{-1} для некоторых ГЦК-металлов (Al, Cu, сплавы Cu-Al), различающихся энергией дефекта упаковки и исходной структурой. Обнаружено резкое дополнительное упрочнение металлов в этих условиях, проявляющееся в изменении хода кривой $\sigma'(\dot{\epsilon})$, увеличении микротвёрдости и уровня внутренних напряжений II рода.

2. Проведены структурные исследования методами металлографии, просвечивающей электронной микроскопии и рассеяния рентгеновских лучей под большими и малыми углами. Показано, что упрочнение металла при импульсном нагружении определяется его субмикроструктурой, в частности, плотностью дислокаций, распределённых по объёму зерна.

О ПРИМЕНЕНИИ ПРОЕКЦИОННЫХ МЕТОДОВ К РЕШЕНИЮ ФИЗИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ

Лисицын Б.М., Булыга К.Б., Убайдуллаев Д.Н.

Рассмотрены процедуры обобщенного проекционного метода применительно к различным случаям физически нелинейных задач механики. Сформулированы требования к системам весовых-определяющих состояний. Проведен анализ структуры разрешающей системы нелинейных алгебраических уравнений и рассмотрены алгоритмы решения таких систем.

Решены числовые примеры.

УЧЕТ ДИСЛОКАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОВ В МОДЕЛИ ВЯЗКОПРУТОГО ТЕЛА МАКСВЕЛЛОВСКОГО ТИПА

Мержиевский Л.А.

Многочисленные исследования, посвященные изучению пластического деформирования и разрушения материалов при интенсивных динамических нагрузках, показывают, что модель, претендующая на адекватное описание этих явлений, должна соединять черты традиционных макроскопических построений, обычно хорошо передающих изменение внешней формы тел (пластические деформации), с микроскопическими, отслеживающими изменение структуры материала. В последнем случае основное внимание сосредоточивается на кинетике дислокационного ансамбля. В данной работе дислокационные представления о пластическом деформировании используются для

замыкания соотношений, описывающих поведение вязкоупругого тела максвелловского типа.

Модель формулируется на основе законов сохранения, записанных с учетом релаксации касательных напряжений в дифференциальной форме, и замыкается уравнением упругой энергии при нескачковом тензоре деформации и зависимостью времени релаксации касательных напряжений от параметров состояния среды. Так как время релаксации пропорционально величине, обратной скорости максимальной пластической деформации $\dot{\epsilon}$, то, воспользовавшись соотношением Орована, получим

$$\tau = a / (b N v),$$

где N , v – плотность подвижных дислокаций на единицу объема и их средняя скорость, b – модуль вектора Бюргерса, $a = a(T)$ – экспериментально определяемый коэффициент пропорциональности, T – температура. При известных зависимостях $N(\sigma, \dot{\epsilon})$, $v(\sigma, \dot{\epsilon})$ определяется функциональный вид $\tau(\sigma, \dot{\epsilon}, T)$ (здесь σ – интенсивность касательных напряжений).

Отыскание параметров, входящих в $\tau(\sigma, \dot{\epsilon}, T)$, проводится на основе экспериментальных данных о зависимости динамического предела текучести от скорости деформации или об ударном сжатии цилиндрических образцов с помощью специально разработанной методики, основанной на минимизации функционала среднеквадратичных отклонений экспериментально определяемых и рассчитанных в данной модели величин. С помощью найденных таким образом зависимостей $\tau(\sigma, \dot{\epsilon}, T)$ решен ряд задач динамического и ударноволнового деформирования металлов. Расчеты хорошо передают эволюцию ударных волн, расщепляющихся на упругий предвестник и пластическую волну. Амплитуды волн, их скорости и времена формирования двухволновых конфигураций соответствуют экспериментальным данным. В хорошем согласии с экспериментальными результатами находится расчет затухания ударной волны при ее взаимодействии с догоняющей волной разрежения и поведение слоистых пластин при импульсных нагрузках. Решены так-

же двумерные осесимметричные задачи о пробивании пластины цилиндрическим ударником, летящим с высокой скоростью, и деформировании конической облицовки с большим углом при вершине конуса под действием продуктов детонации взрывчатого вещества. В этих случаях также наблюдается хорошее совпадение расчетных и экспериментально измеряемых величин, что свидетельствует о применимости модели для решения широкого круга задач динамического деформирования металлов.

ПРИМЕНЕНИЕ КРИТЕРИЯ РАЗВИТОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА КИНЕТИКИ РОСТА ТРЕЩИНЫ ПРИ УДАРНО - ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Новиков И.И., Ботвина Л.Р., Иванской В.А., Малолетнев А.Я.,
Львов Ю.Б.

Для анализа роста трещины в двухфазной никелевой стали 40Н14 и стали 45 использовали ранее предложенный / 1 / критерий K_{84} , который оценивали по нагрузке, вызывающей текучесть материала и длину трещины, соответствующей появлению остаточного пластического прогиба образца. Сталь 40Н14 исследовали в 4 - х состояниях, отличающихся различным фазовым составом, т.е. содержанием мартенсита и остаточного аустенита. В зависимости от термообработки доля остаточного аустенита изменялась от 40 до 10%.

С уменьшением доли аустенита форма кинетической диаграммы усталостного разрушения изменяется: при 30% аустенита на диаграмме появляется перелом, а при 20 - 10% - разрыв в области скоростей развития трещины $\dot{V} = 10^{-6}$ м/цикл. Оценка нагрузки текучести и прогиба образца показали, что разрыв диаграммы связан с увеличением циклического предела текучести при увеличении амплитуды нагружения. Диаграмма распадается на две ветви: нижнюю / при σ_{T1} / и верхнюю / при σ_{T2} /. Каждая ветвь имеет перелом при K_{841} и K_{842} , отвечающий переходу от упругого к пластическому развитию трещины, характеризующемуся появлением остаточного пластического прогиба образца.

Исследование изломов выявило различие механизмов разрушения при $K_{max} < K_{gy}$ / упругая усталость/ и при $K_{max} > K_{gy}$ / пластическая усталость/. В первом случае наблюдается сдвиговый рельеф, во втором – разрушение путём отрыва с большим числом пор и вторичных микротрещин, геометрия которых изменяется с увеличением K_{max} и свидетельствует об изменении локального напряженного состояния в устье трещины. При построении полученных кинетических диаграмм усталостного разрушения в координатах $\sigma/\sqrt{a} - K_{max} / K_{gy}$ разрыв исчезает и все экспериментальные точки укладываются на прямую, соответствующую области упругой усталости, и несколько ветвей, соответствующих пластической усталости. Площади, ограниченные пластическими ветвями, прямо пропорциональны работе деформирования при статическом нагружении.

Построение кинетических диаграмм в относительных координатах $\sigma/\sqrt{a} - K_{max} / K_{gy}$ приводит к получению единой прямой / в логарифмических координатах/ для всех исследованных материалов. Это свидетельствует о подобии процесса усталостного разрушения в изученных материалах и возможности прогнозирования трещиностойкости в условиях ударно-циклического нагружения.

Литература

И. Л.Р.Ботвина. Критерий усталостного разрушения, характеризующий начало развитого пластического течения в вершине трещины. В кн.: Циклическая вязкость разрушения металлов и сплавов. М., "Наука", 1981г., с. 53- 59.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАСТИЧНОСТИ НАЧАЛЬНО-АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Огибалов П.М., Кузнецов В.Н., Савов П.М., Алифанов А.В.

Расчет деталей из начально-анизотропных материалов предполагает возможность учета малых упруго-пластических деформаций, что требует формулировки соответствующих уравнений состояния и их экспериментальной проверки. В настоящее время нам представляется эффективной постановка задачи о рас-

чете на прочность ортотропных тел на базе известной и широко используемой теории малых упруго-пластических деформаций.

В докладе представлены экспериментальные данные о простом нагружении трубчатых образцов из трансверсально-изотропного материала при воздействии осевой силы, кручения и внутреннего давления, полученные в Институте механики МГУ.

С учетом этих и других известных из литературы данных построена теория малых упруго-пластических деформаций начально-анизотропных материалов.

Построенные соотношения делают возможной корректную постановку краевых задач, физически аналогичную постановке известной теории малых упруго-пластических деформаций А.А.Ильюшина.

О ДИНАМИЧЕСКОМ ПОВЕДЕНИИ ЖЁСТКО-ПЛАСТИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ И ОПТИМАЛЬНОМ РАСПОЛОЖЕНИИ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОПОР

Оленев Г.М.

На основе модели жёстко-пластического тела изучается поведение импульсно нагруженных различным образом закреплённых круглых и кольцевых пластинок и цилиндрических оболочек и находится оптимальное расположение дополнительных опор к ним.

Рассматривается сравнительно мало изученное в литературе импульсное нагружение, когда все точки конструкции, кроме опорных, имеют постоянную начальную поперечную скорость прогиба, а сама конструкция в начальный момент времени не деформирована.

Найден остаточный прогиб импульсно нагруженной заделанной по краю круглой жёстко-пластической пластинки в случае условия текучести в виде квадрата.

Описано динамическое поведение различным образом закреплённых по краям жёстко-пластических кольцевых пластинок при импульсном нагружении как в случае условия текучести

в виде квадрата, так и в случае условия текучести Треска.

Решены задачи деформирования жестко-пластических цилиндрических оболочек, подверженных импульсному нагружению, при различных условиях закрепления их концов. При этом механизмы движения существенно зависят от параметра оболочки $\epsilon^2 = \frac{h^2}{12R}$, где l , h и R - длина, толщина и радиус оболочки соответственно.

На основе решения этих прямых задач находится оптимальное расположение дополнительных опор к импульсно нагруженным жестко-пластическим круглым пластинкам и цилиндрическим оболочкам, причем расположение дополнительных опор выбирается так, чтобы при этом достигал минимума максимальный остаточный прогиб для всей конструкции. Установка дополнительных опор является одним из способов уменьшения податливости конструкций.

Оценивается также выигрыш, доставляемый оптимальным решением по сравнению с другим допустимым вариантом расположения опор.

Методом модальных движений решена задача оптимального расположения дополнительной опоры к заделанной с одного и свободной с другого конца жестко-пластической цилиндрической оболочке при импульсном нагружении.

УЧЕТ ПОЛЗУЧЕСТИ В РАСЧЕТАХ ВНЕЦЕНТРЕННО СЛАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ЛЕГКОГО БЕТОНА

Пирадов А.Б., Аробелидзе В.И., Хуцишвили Т.Г.

Учет перераспределения усилий в сечении бетонных элементов будет способствовать более эффективному проектированию конструкций. Перераспределение же усилий является результатом проявления нелинейной ползучести бетона.

Для вычисления нелинейной деформации ползучести принята зависимость ϵ / I /:

$$\epsilon_n(t) = F[\delta(\tau)] C(t, \tau), \quad (I)$$

где $\sigma(t, \tau)$ — мера ползучести бетона,

$F[\sigma(\tau)]$ — некоторая функция, характеризующая нелинейную зависимость между напряжениями и деформациями ползучести.

Численная реализация зависимости (1) связана с заданием функции $F[\sigma(\tau)]$ и определении входящих в нее при этом численных коэффициентов. В наших расчетах ее приняли равной

$$F[\sigma(\tau)] = \sigma(\tau) + \alpha \sigma^2(\tau), \quad (2)$$

где $\sigma(\tau)$ — действующее напряжение при загрузке в кг/см².

Коэффициент α был определен на основе опытных данных условно линейной и нелинейной деформации ползучести и графически в зависимости от уровня напряжения приведен на рис. 1.

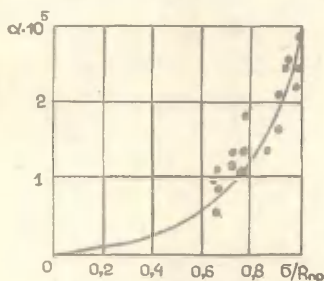


Рис. 1

Статистическая обработка полученных данных с некоторым округлением численных коэффициентов позволила написать зависимость:

$$\alpha = \frac{\sigma / R_{пр} \cdot 10^{-5}}{2,48 - 2,22 \sigma / R_{пр}}, \quad (3)$$

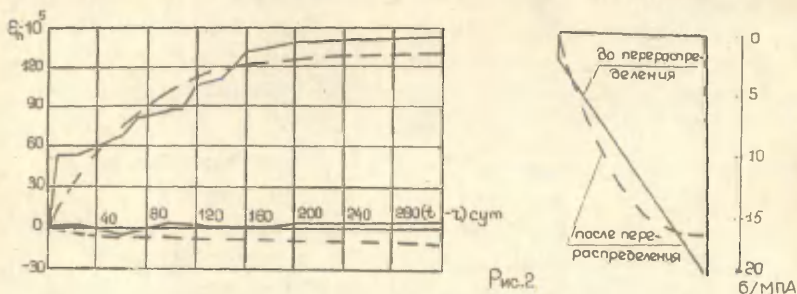
где σ — действующее напряжение,
 $R_{пр}$ — призмная прочность бетона.

Для определения перераспределения усилий в сечении во времени использована методика, разработанная ИСМиС АН СССР / 2 /. В этой методике учет ползучести произведен согласно (2) и (3), а мера ползучести принята по / 1 /, с численными коэффициентами, приведенными в / 3 /.

Расчет производится следующим образом. Заданы краевые напряжения и кривизна. По этим данным вычисляется начальное положение нейтральной оси, которое в процессе итерации корректируется до тех пор, пока не будут соблюдены условия равновесия. Зная положение нейтральной оси, вычисляем полные относительные деформации в каждой полосе и из интегрального уравнения ползучести вычисляем напряжения, полученные в результате перераспределения усилий во времени.

Сопоставление полученных из расчета и замеренных из опи-

та значений относительных деформаций бетона для одного из испытанных образцов приведено на рис. 2. Там же приведено



изменение эпюры напряжений в бетоне вследствие перераспределения усилий во времени в течение 300 суток.

Экспериментально получено и теоретически подтверждено, что перераспределение усилий в сечении приводит к уменьшению краевых напряжений. При этом разгрузка более напряженных фибр сопровождается нагружением менее напряженных.

Литература

1. Арутюнян Н.Х. Некоторые вопросы теории ползучести. Гостехтеориздат, М.-Л.: 1952, с.323.
2. Кизирия Г.В., Гвинчидзе Г.И., Дзодзуашвили Г.Г. Определение усилий в неоднородных, статически неопределимых конструкциях с учетом нелинейных деформаций ползучести бетона. Строительная механика и расчет сооружений, М: 1981, № 3, с. 37-41.
3. Пирадов А.Б., Дахундаридзе Т.Ш. К определению численных коэффициентов в формуле меры ползучести бетона. Сообщения АН Груз.ССР, т. 91, № 1, изд-во "Мецниереба", Тбилиси, 1978, с. 97-100.

АНИЗОТРОПНАЯ ПЛАСТИЧНОСТЬ

Победра Б.Е.

Формулируются принципы построения теорий пластичности первоначально анизотропных материалов. Описывается теория малых упруго-пластических деформаций таких материалов и теория пластического течения. Анализируются возможности применимости постулата изотропии А.А.Ильюшина в случае общей теории пластичности первоначально анизотропных материалов. Предлагается вариант теории пластичности, в которой учитывается деформационная анизотропия.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СДВИГОВОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В СТРУКТУРНО-НЕОДНОРОДНЫХ ТЕЛАХ

Попов Л.Е., Ковалевская Т.А., Дудка Е.В.,
Колупаева С.Н., Трандина О.П., Сергеева О.А.

Пластическая деформация кристаллических тел в широком интервале скоростей деформации и температур осуществляется с необходимым участием трансляционных механизмов [1 - 3]. Различного типа неустойчивости дислокационных конфигураций, ответственных за размножение дислокаций, приводят к локализации скольжения в зонах сдвига (и к появлению наблюдаемых следов скольжения). Практически вся макроскопическая пластическая деформация обусловлена скольжением в зонах сдвига; вклад элементарного скольжения незначителен. Формирование зон сдвига является, таким образом, основным процессом пластической деформации, зона сдвига - адекватным структурным уровнем при рассмотрении сдвиговых процессов пластической деформации, а средний диаметр зоны сдвига - естественной масштабной характеристикой этого структурного уровня [4].

При рассмотрении пластической деформации гетерофазных тел их удобно классифицировать по соотношению между диаметром зон сдвига D и масштабными характеристиками структуры (например,

размером δ элементов структуры и расстоянием между ними). Кроме рассматриваются два предельных случая, когда: 1) размер зоны сдвига много больше линейных характеристик структуры ($D \gg \Lambda, D \gg \delta$) и 2) размер зоны мал по сравнению с этими характеристиками ($D \ll \Lambda, D \ll \delta$).

Система уравнений кинетики сдвиговой пластической деформации в общем случае включает: 1) закон пластического течения, 2) уравнения баланса деформационных дефектов, 3) уравнения, описывающие характер деформирующего воздействия на тело. Применительно к случаю гетерофазных тел уравнения этой системы трансформируются таким образом, чтобы учесть дополнительные упрочняющие факторы.

В предположении, что зона сдвига формируется в результате потери устойчивости сегментом-источником, неподвижным до достижения критического напряжения, закон пластического течения записывается в форме:

$$\dot{\alpha} = N(\rho, \tau) [\Delta Q(\tau, \rho) / \Delta t(\tau, \rho)] \cdot \delta,$$

где $N(\rho, \tau)$ - число активных источников в единице объема, $\Delta Q(\tau, \rho)$ - площадь, заметаемая всеми дислокациями одной зоны в процессе ее формирования, $\Delta t(\tau, \rho)$ - время образования зоны, τ - напряжение, ρ - плотность дислокаций. В случае дисперсно-упрочненных материалов с $D \gg \Lambda, D \gg \delta$ учитываются действующие на скользящую дислокацию дополнительные силы, обусловленные присутствием частиц (силы изображения, силы взаимодействия с кольцами Орована и призматическими петлями и т.д.). Уравнение баланса дислокаций записывается на основе модели Хирма-Хазендрина. При вычислении скорости аннигиляции учитывается, что в результате захвата скользящих винтовых дислокаций в дипольные конфигурации с последующей их аннигиляцией не образуется некоторое количество колец Орована и призматических петель, которые возникли бы в отсутствие аннигиляционных процессов. Найдено, что параметр аннигиляции путем поперечного скольжения несколько меньше, чем в материале, не содержащем частиц.

Численным решением системы уравнений баланса дислокаций, вакансий, бивакансий и межузельных атомов совместно с законом пластического течения и уравнениями, описывающими способ дефор-

мирования, получены кривые упрочнения при активной деформации, кривые деформации при ползучести, релаксации, программном нагружении дисперсно-упрочненных материалов. Рассмотрен спектр дислокационных不устойчивостей, ответственных за локализацию сдвига в гетерофазных сплавах, а также характер изменения степени локализации сдвига с увеличением деформирующего напряжения и плотности дислокаций. Получены кривые деформации $\tau = \tau(\alpha)$ при разгрузке (аномальная обратимая деформация) и последующем нагружении в прямом или обратном (эффект Баушингера) направлении.

В случае $\delta \gg D$ и $L \gg D$ неоднородное тело рассматривается как система параллельно-последовательно расположенных независимых пластичных элементов. Рассчитаны совместная ползучесть и активная деформация композиций металлов, сплавов, интерметаллических соединений.

Литература

1. Панин В.Е., Гриняев Д.П., Елсукова Т.Ф., Иванчин А.Г. Структурные уровни деформации твердых тел. Изв. вузов. Физика, № 6, 1982, с.5-27.
2. Лихачев В.А., Малинин В.Г., Физико-механическая модель упругопластических свойств материалов, учитывающая структурные уровни деформации и кинетические свойства реальных кристаллов. Изв. вузов. Физика, № 9, 1984, с.28-33.
3. Попов Л.Е., Кобытев В.С., Ковалевская Т.А. Пластическая деформация сплавов. М.: Металлургия, 1984, 182 с.
4. Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов. М.: Металлургия, 1984, 280 с.

МЕТОД НАРАЩИВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ В МЕХАНИКЕ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Постоев В.С., Бирюков Д.Б.

Метод наращивания элементов (МНЭ), как и метод конечных элементов (МКЭ), основан, прежде всего, на представлении сплошного тела в виде совокупности отдельных конечных элемен-

тов, взаимодействующих между собой в конечном числе точек.

Его принципиальное отличие от МКЭ заключается в процедуре решения задачи сопряжения конечных элементов. В МКЭ задача сводится, как правило, к решению системы алгебраических уравнений высокого порядка, которыми описывается состояние неразрывности или равновесия в каждом узле всей области. Опыт показывает, что наибольшие трудности возникают при решении этих систем уравнений.

Не всегда оказывается возможным существующими методами расчета с применением современных ЭВМ обеспечить устойчивость решения алгебраических уравнений.

В методе наращивания элементов нет необходимости формировать систему уравнений для всей решаемой области. Область образуется путем последовательного наращивания элементов.

При каждом наращивании решается задача сопряжения только одного элемента с той частью тела (базой), которое было образовано предыдущим наращиванием. При этом взаимодействие между частью тела и элементом описывается системой алгебраических уравнений, количество неизвестных в которой равно числу статически неопределимых связей между базой и наращиваемым элементом.

Задача сопряжения в усилиях при известной матрице податливости элемента решается элементарно просто. Во многих задачах это решение можно представить в виде рекуррентных алгебраических соотношений через взаимные податливости узлов, а всю процедуру наращивания, так называемый прямой ход, системой рекуррентных соотношений. Доказывается, что при любой сетке разбиения алгоритм МНЭ устойчив. Алгоритм хорошо программируется и вместе с этим представляется возможным составлять программы расчета с более общих позиций по сравнению с тем, как это делается по МКЭ.

Проблема получения устойчивых решений с использованием численных методов особенно актуальна в геометрически и физически нелинейных задачах при больших пластических деформациях.

С помощью МНЭ, используя известную процедуру шаговых решений, можно получать устойчивые результаты при сколь угодно больших пластических деформациях.

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ СПЛАВОВ ПРИ СЛОЖНЫХ РЕЖИМАХ НАГРУЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ПРОГРАММНОГО ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Самойлович С.С., Сыров В.П., Смушкенвич Л.М., Шульга Б.Н.

Изучены пластическая деформация и разрушение сплавов при сложных режимах нагружения в условиях изменения температуры по определенным законам.

Для проведения эксперимента серийная испытательная машина УМЭ-ЮТМ была оборудована специальной следящей системой привода нагружения и температуры, с помощью которой отслеживались определенные законы изменения нагрузки и температуры во времени. По законам, задаваемым на аналоговых вычислительных машинах МН-7 или специальном дискретном задатчике, с помощью мощного тиристорного привода и связей (по силе, деформации и температуре) исследуемые образцы доводились до разрушения. Исследованию по линейным и степенным законам изменения нагрузки и температуры во времени при растяжении подвергались образцы сплавов АМГ-6, Д16Т, ВТ1-0 и ЗОХТСА. Обработка экспериментальных данных проводилась по специально подготовленной программе на ЭВМ ЕС-1022. Фрактографический анализ изломов осуществлялся на электронном микроскопе РЭМ-100.

В результате проделанной работы показано, что с кинетических позиций можно прогнозировать пластическую деформацию и разрушение, наблюдаемые при сложных режимах нагружения в условиях программного изменения температуры.

СТРУКТУРА И ПРОЧНОСТЬ СПЕЧЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Фирстов С.А., Саржан Г.Ф., Подрезов Ю.Н.

Рассмотрена морфология внутренних границ раздела спеченных материалов, а также их влияние на комплекс механических свойств в широком интервале температур. Показано, что изменение связности структуры пор (или включений) может обусловить немонотонную зависимость изменения механических свойств от объемной доли пор (или включений) в области низких температур, что наблюдается как для керамических, так и

для металлических материалов.

При анализе механических свойств существенным является учет эволюции пористой структуры непосредственно в процессе испытания. В дисперсно-упрочненных материалах значительную роль в формировании механических свойств играет явление декогезии на границах раздела частица – матрица. Вероятность декогезии и соответственно потеря пластичности определяется интенсивностью протекания процесса возврата структуры внутренних границ раздела.

Рассмотрено влияние когезивной прочности границ раздела на склонность к межзеренному разрушению и температурную зависимость трещиностойкости.

Показано, что при высокотемпературной деформации ослаблены границы раздела и потеря когезивной прочности приводит к интенсификации межзеренного проскальзывания и изменению особенностей макродеформации (склонности к локализованной деформации) и микромеханизма деформации и разрушения.

РАСЧЕТ ПЛАСТИЧЕСКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

ПРИ БОЛЬШИХ ПРОГИБАХ

Ханнус С.Х.

Рассматривается поведение жестко-пластических однородных круглых цилиндрических оболочек, подверженных действию равномерно распределенной поперечной нагрузки и заданному осевому растяжению. Предполагается, что концы цилиндров заделаны. Учитываются умеренно большие прогибы, т.е. прогибы до порядка толщины оболочек.

При определении напряженно-деформационного состояния оболочек используется теория пластичности типа деформации. Материал оболочек считается идеально жестко-пластическим, подчиняющимся условию текучести Мизеса, которое удовлет-

воряется в интегральном виде.

Задача сводится к краевой задаче, которая решается численно на ЭВМ. Полученные результаты представляются в виде нескольких рисунков. Численные результаты сравниваются с решениями, соответствующими кусочно-линейным аппроксимациям условия текучести.

ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ РЕЛАКСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ

Чижик А.А., Ланин А.А.

Определены условия развития трещин при релаксации напряжений на основе модельных представлений о чистой релаксации в телах с трещинами и релаксации с упругим звеном. Теоретический анализ стадий развития трещин показал, что существенное влияние на разрушение оказывают характер временной зависимости вязкости разрушения, реологические свойства материала и запас упругой энергии в теле с трещиной. Предложена схема предельного состояния тел с трещинами в условиях релаксации напряжений. Дана классификация материалов по трещиностойкости.

Для оценки трещиностойкости материалов при релаксации напряжений разработан метод испытаний кольцевых образцов, позволяющий проводить массовые испытания в широком диапазоне температур и времен.

Разработанные теоретический и методический подходы подтверждены экспериментальными результатами по оценке трещиностойкости материалов в условиях релаксации напряжений.

СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ В СВЯЗИ С ПРОТЕКАЮЩИМИ В НИХ ФАЗОВЫМИ ПРЕВРАЩЕНИЯМИ

Брмולהев В.А., Лихачев В.А., Разов А.И.

В докладе обзорного плана изложены основы механики пластичности для сред с фазовыми превращениями. Экспериментально показано, что механические свойства во время мартенситных диффузионных или аллотропических превращений в твердой фазе претерпевают существенные изменения. Реакция в твердом теле приводит к резкому снижению сопротивления пластической деформации и увеличению пластичности. В режиме неизотермической ползучести, начало фазовой трансформации решетки сопровождается значительным увеличением скорости ползучести и при нагреве, и при охлаждении металла. Окончание процесса ускорения ползучести совпадает с концом фазового превращения. В опытах с заданной деформацией изменения температуры сопровождаются интенсивной релаксацией напряжений, которые быстро спадают до нуля. Показано, что накапливающаяся в таких опытах неупругая деформация строго пропорциональна приложенным напряжениям; пропорциональна напряжениям и скорость этой деформации. Последняя линейно связана со скоростью фазового превращения или со скоростью изменения температуры. Приведены данные о предельной пластичности стали в связи с фазовыми превращениями. Установлено, что пластичность при растяжении увеличивается, если материал испытывает фазовое превращение, инициированное термическим воздействием.

Особое внимание уделено описанию свойств сплавов, обладающих эффектом памяти формы. Показано, что бездиффузионные мартенситные реакции могут реализоваться с соблюдением принципа "точно назад", когда пути перегруппировок атомов при прямом и обратном превращениях оказываются противоположными. В этом случае деформация, сообщенная телу до начала мартенситной реакции или в процессе прямого превращения полностью восстанавливается при обратном фазовом переходе. Возврат ее имеет место, независимо от наличия противодействующего усилия, а при заземлении вызывает генерацию реактивных напря-

жений. Приведены многочисленные конкретные примеры.

Изложена теория механического поведения материалов с фазовыми превращениями. Описано несколько физико-механических моделей. Одна из них основана на идеях о планарных дефектах кристалла. Считается, что пластическая дисторсия осуществляется за счет движения границ раздела фаз. Вычислены движущие силы, действующие на границе раздела фаз, пластические дисторсии и повороты вещества в заметаемом границей объеме. Установлено, что основная причина реакции — химический стимул, обусловленный разностью термодинамических потенциалов соприкасающихся фаз; сила механического характера, инициированная полями напряжений, играет роль малого возмущающего параметра. В другой модели за основу принят известный закон Клаузиуса-Клапейрона, устанавливающий взаимосвязь между механическими напряжениями, дисторсиями фазового перехода, теплотой превращения и температурами химических реакций. По такой логике макроскопическая дисторсия в поле внешних сил возникает потому, что зарождающиеся кристаллы имеют предпочтительную ориентацию в направлении действия механического напряжения, и что такая ориентационная избирательность служит причиной появления нескомпенсированных микродисторсий превращения.

Показано, что оба подхода позволяют получить линейную связь между девиаторами пластической деформации и напряжений.

Выведенные соотношения положены в основу построения определяющих уравнений механики пластичности для сред с фазовыми превращениями. Сформулированная система уравнений апробирована с положительным результатом на примере расчета термомеханических свойств материалов в связи с фазовыми реакциями и на примере расчета нового типа мартенситных двигателей с металлическим рабочим телом. Приведены примеры вычислений для стержневых конструкций. Решена краевая задача механики пластичности для случая пластины, испытывающей резкие теплосмены. Результаты расчетов сравниваются с экспериментами.

С о д е р ж а н и е

Абашидзе А.И., Абашидзе Г.А., Косая Т.А., Ландау С.З. (Тбилиси), Усталостная прочность железобетонных конструкций	144
Александров А.В., Степанов И.Е., Волков А.Д. (Москва), Пластическая зона впереди трещины в ОЦК-металлах в условиях плоской деформации.	3
Алявдин П.В. (Минск), О соотношениях для обобщенных усилий в задачах приспособляемости стержней, пластин и оболочек ..	146
Андронов В.М., Гвоздилов А.М. (Харьков), Влияние напряженного состояния на фронте полосы Льюиса-Чернова на неустойчивость пластического течения	5
Антонов Е.Н., Лебедев В.А. (Ленинград), Упруго-пластические деформации оболочек вращения цилиндрического и конического типа с концентраторами напряжений ...	6
Аубакирова Р.К., Пресняков А.А., Байдельдинова А.Н. (Алма-Ата), Сверхпластичность и сопротивление деформированию α -титановых сплавов	8
Аунин У.Х. (Тарту), Оптимизация импульсивно нагруженных армированных балок из жестко-пластического материала	145
Барахтин Б.К., Сорокина Л.И., Александрова Т.В., Макаров В.В., Шахназаров Ю.В. (Ленинград), Остаточная упругая деформация на поверхности излома, как критерий свойств сталей с различным содержанием углерода.	9
Басараба Д.М., Кадобянский Р.Н. (Львов), Деформация пластичности и температурного последствия при теплосменах в случае чистого сдвига	11
Бенгус В.З., Табачникова Е.Д. (Харьков), Локальная макроскопическая пластическая деформация аморфных металлических лент, обусловленная волнами напряжений ..	12

Бестужева Н.П., Даринский Б.М. (Воронеж), О поверхностных динамических явлениях в пластически деформирующихся средах	14
Бирковский А.А., Владимиров В.И., Романов А.Е. (Ленинград), Зарождение ротационной пластичности в приповерхностных слоях	147
Блинов Э.И. (Львов), К вопросу аналитического описания неизотермической деформации металлов	4
Борисенко Н.Д., Шохворостова М.И., Пресняков А.А. (Алма-Ата), Некоторые закономерности пластического течения материалов при одновременном растяжении и кручении	17
Ботвина Л.Р. (Москва), Критерий развитой пластической деформации в вершине трещины	149
Брагинский А.П., Евсеев Д.Г., Медведев Б.М. (Москва), Об акустикоэмиссионном измерении коэффициента интенсивности напряжений	18
Бровко Г.Л. (Москва), Об исследовании класса задач пластичности при малых и конечных деформациях	20
Брында А.А., Островерхов Н.П. (Днепропетровск), Ударное нагружение подкрепленных оболочек с учетом местных упругопластических деформаций	150
Будин Е.М., Снитко А.Н. (Ленинград), Исследование напряженно-деформированного состояния упруго-пластических устройств из труб	152
Буслов А.С., Кучеренко Л.М., Топоровская Б.И. (Самарканд) Взаимодействие гибких анкеров с ползучим основанием	22
Быков В.А. (Ленинград), Пластичность и прочность материала конструкций в зависимости от деформационного упрочнения	155
Вавакин А.С., Кулиев Р.М. (Москва, Баку), Упругопластическое деформирование стали в условиях сложного знакопеременного нагружения	156

Вервейко Н.Д. (Воронеж), Динамическое деформирование тонких оболочек вращения из упруго-вязкопластического материала	23
Викторов В.В., Степанов Л.П. (Москва), Проявление временных эффектов при сложном нагружении	25
Виноградова Т.П., Загрядский Н.И., Коротких Ю.Г. (Горький), Применение структурной модели для описания фазовых превращений при термообработке стали	27
Возианов А.Н. (Ленинград), Бифуркация моментного состояния тонкой оболочки с учетом сжимаемости материала.	29
Волков А.Е. (Ленинград), Пластическая деформация среды с двумя структурными уровнями ..	31
Вульман С.А., Семькина Т.Д. (Воронеж), Применение метода возмущений в задаче о чистом изгибе листа с учетом упрочнения	33
Горбачев М.И., Александрова И.П., Снитко А.Н. (Ленинград), Оптимальное проектирование многослойных цилиндрических упруго-пластических оболочек при термомеханических воздействиях	34
Горев Ю.Г. (Ленинград), Динамический расчет железобетонных оболочек сложной геометрии в упругопластической стадии	36
Греков М.А. (Ленинград), О влиянии гидростатических напряжений на текучесть анизотропного тела	38
Гриднева И.В., Мильман Ю.В., Чугунов С.И. (Киев), Деформация и разрушение кристаллов при локальном нагружении индентором	39
Гудрамович В.С., Деменков А.Ф. (Днепропетровск), О влиянии упрочнения материалов и нарушения формы при поперечном динамическом нагружении на поведение пластических конструкций	40
Гукасов Л.Г., Челноков В.А., Титовец Ю.Ф., Кузьмин Н.Л. (Ленинград), Особенности субмикрoplastической деформации поликристаллов	42

Данилов А.И., Ерхов М.И. (Москва), Общие теоремы динамики жесткопластического тела при конечных изменениях конфигурации	43
Демяшев Г.М., Хусаинов М.А. (Новгород), Микропластичность карбидов и нитридов металлов IYA подгруппы ...	44
Дехтярь А.С. (Киев), Несущая способность циклически симметричных оболочек	45
Дидух Б.И. (Москва), Механика упруго-пластического деформирования зернистой среды	46
Ермолаев В.А. (Ленинград), Пластическая деформация при мартенситных превращениях изотропных поликристаллов	48
Засимчук Е.В., Селицер С.И. (Киев), Пластичность кристаллов с полигональной структурой	50
Индейкин А.В. (Ленинград), Вероятностное определение критических параметров нагрузки в упруго-пластической задаче об устойчивости сжатой пластины	158
Кадашевич Ю.И., Михайлов А.Н. (Ленинград), Учет микроразрушения в теории пластического течения.....	51
Калекин О.Ю., Кантор Б.Я. (Харьков), Теория пологих упруго-пластических оболочек, составленных из неспаянных слоев	52
Кандауров И.И. (Ленинград), Механика зернистых сред, задачи пластичности	159
Картвелишвили В.М. (Москва), Аспекты численного моделирования упруго-пластического поведения структурно-неоднородных сред и конструкций с концентраторами напряжений	53
Качалов Ж.В., Листрова Ю.П., Потапов В.Н. (Воронеж), О динамическом деформировании круглой пластины в сопротивляющейся среде	55
Кирс Ю., Кенк К. (Таллин), Оптимальное проектирование круговых пластин с учетом упрочнения	57

Кислоцкий В.Н., Зверев А.А., Постешкин (Киев), Числен- ное моделирование процессов пластического деформи- рования при высокоскоростном взаимодействии элемен- тов конструкций	58
Кобытев В.С., Колупаева С.Н. (Томск), Математическое моделирование сдвиговых процессов симметричной плас- тической деформации	60
Корнишин М.С., Столяров Н.Н., Райков Е.А. (Казань), Уп- руго-пластическое деформирование гибких пластин и оболочек при сложных программах нагружения	62
Короткина М.Р. (Москва), Современные проблемы струк- турной теории пластичности	64
Котляревский В.А., Костин А.А. (Москва), Динамика упру- гопластических конструкций, взаимодействующих со средами	65
Крамаренко И.В., Красовский А.Я., Лихачев В.А. (Киев, Ле- нинград), Фрактографическое исследование вязкого ин- теркристаллитного разрушения крупнозернистого никеля при развитии трещины усталости	161
Красовский А.Я. (Киев), Локализованное в вершине трещи- ны пластическое течение и закономерности хрупкого разрушения металлов	67
Кривилев В.А. (Москва), Термопластические волны напря- жений при нагреве конструкций	69
Куров И.Е., Врагов А.М., Шакалова Г.И., Евплов А.И. (Горький), Влияние исходной структуры на пластич- ность и упрочнение ГЦК металлов при высокоскорост- ном нагружении	166
Лаврентьев Ф.Ф., Геткин А.В., Геткина И.В. (Харьков), Коллективные дислокационные эффекты при ротационной пластичности в кристаллах цинка	70
Лантух-Лященко А.И., Снитко А.Н. (Киев, Ленинград), При- менение дискретно-континуальной формы МКЭ для реше-	

ния нелинейных задач пластичности	72
Лебедев А.А., Ковальчук В.И., Косарчук В.В., Зайцева Л.В. (Киев), Упругопластическое деформирование структурно-нестабильных материалов	74
Лебедев В.А., Санжаровский Р.С. (Ленинград), Теория и расчет сжатых упруго-пластических элементов при динамическом нагружении	75
Леллеп Я.А. (Тарту), Оптимальное проектирование жестко-пластических элементов конструкций	163
Леллеп Я.А., Маяк Ю.П. (Тарту), Оптимальное проектирование неоднородных пластических балок с учетом больших прогибов	165
Леонтьева А.В., Романуша В.А., Стрельцов В.А. (Донецк), Особенности деформации и разрушения криокристаллов.	76
Лепикулт Т.А. (Тарту), Автоматизированный расчет динамического изгиба и оптимального проектирования жесткопластических балок ступенчато-постоянной высоты ..	78
Лисицын Б.М., Булыга К.Б., Убайдулаев Ю.Н. (Киев), О применении проекционных методов к решению физических нелинейных задач механики	167
Лихачев В.А., Мозгунов В.Ф. (Ленинград), Влияние температурной зависимости предела текучести на напряженное состояние пластины при термоциклировании	79
Лукерченко В.Н. (Москва), К вопросу о влиянии исходной дислокационной структуры на скоростную зависимость напряжения пластического течения	81
Макагонов В.А., Полянский М.М., Эсаулов С.Л. (Ленинград), Учет пластических свойств бетонов на ранней стадии при проектировании массивных конструкций	82
Макагонов В.А., Цветков С.В. (Ленинград), Учет пластических свойств бетона в конструкциях при сложном напряженном состоянии	84

Малинин В.Г. (Рубежное), Структурно-аналитическая модель среды, основанная на трансляционно-ротационном массопереносе с учетом взаимодействующих масштабных уровней	86
Малинин В.Г., Овчаренко С.Я., Мартюхин Г.А. (Рубежное) Экспериментальное исследование пластических деформаций стали под высоким гидростатическим давлением..	87
Мелбарис Ю.Г. (Рига), Деформируемость пространственно армированного композита с упругопластической нелинейно упрочняющейся матрицей	89
Мержиевский Л.А. (Новосибирск), Учет дислокационной структуры металлов в модели вязкоупругого тела максвелловского типа	167
Мещеряков Ю.И., Диваков А.К. (Ленинград), Об измерении неравновесной функции распределения частиц по скорости в упруго-пластических волнах	90
Муравин Г.Б., Лезвинская Л.М., Шаферман И.М., Ботвина Л.Р. (Москва), Исследование пластического деформирования материалов методом акустической эмиссии ..	91
Набережных В.П., Фельдман Э.П., Юрченко В.М. (Донецк), О влиянии сегрегации примесей на сверхпластичность течения	92
Назик В.Д., Бирик З.И., Андронов В.М., Нерубенко В.В. (Харьков), Влияние примесей на акустическую эмиссию при пластической деформации монокристаллов алюминия.	93
Некрасов В.В., Бабин В.В. (Ленинград), Применение метода характеристик к расчету упругопластических рам на действие динамической нагрузки	93
Новиков И.И., Ботвина Л.Р., Ивановской В.А., Малолетнев А., Львов Ю.Б. (Москва, Климовск), Применение критерия развитого пластического течения для анализа кинетики роста трещины при ударно-циклическом нагружении	169

Носкова Н.И., Вильданова Н.Ф., Потапов А.П. (Свердловск) Физика пластичности аморфных лент сплава в условиях прокатки и растяжения	97
Овидько И.А., Романов А.Е. (Ленинград), Пластичность в телах с дислокационными и дисклинационными источни- ками (калибровочная теория)	99
Овчаренко С.Я., Малинин В.Г. (Рубежное), Универсальная установка для исследования механических свойств ма- териалов при сложном напряженном состоянии и раз- личных скоростях деформирования	100
Огибалов П.И., Кузнецов В.Н., Савов П.М., Алифанов А.В. (Москва), Экспериментально-теоретические исследова- ния пластичности начально-анизотропных материалов ..	170
Оленев Г.М. (Тарту), О динамическом поведении жестко- пластических конструкций и оптимальном расположении дополнительных опор	171
Пальмов В.А. (Ленинград), Принципы термодинамики в тео- рии определяющих уравнений	101
Панин В.Е., Гриняев Ю.В. (Томск), Геометрические прин- ципы пластической деформации и разрушения кристаллов	102
Пирадов А.В., Аробелидзе В.И., Хуцишвили Т.Г. (Тбилиси) Учет ползучести в расчетах внецентренно сжатых эле- ментов из легкого бетона	172
Плетнев В.И., Овсий В.М. (Ленинград), Физически нелиней- ный расчет коробчатых систем методом суперэлементов в форме метода сил	104
Победра Б.Е. (Москва), Анизотропная пластичность	175
Попов Л.Е., Ковалевская Т.А., Дудка Б.В., Колупаева С.Н. Трандина О.П., Сергеева О.А. (Томск), Моделирование сдвиговой пластической деформации в структурно-не- однородных телах	175
Постоев В.С., Бириков Д.Б. (Ленинград), Метод наращива- ния элементов в механике твердого тела	177

Разов А.И., Ермолаев В.А., Лихачев В.А. (Ленинград), Свойства металлов в связи с протекающими в них фазовыми превращениями	182
Русинко К.Н. (Львов), Вопросы концепции скольжения в теории пластичности и ползучести	105
Самойлович С.С., Сыров В.П., Смушкевич Л.М., Шульга Б.Н. (Ижевск), Исследование кинетики пластической деформации и разрушения сплавов при сложных режимах нагружения в условиях программного изменения температуры ..	179
Саррак В.И. (Москва), Микропластичность металлических материалов с внутренними напряжениями	106
Сахаров А.С., Бойко И.П., Козак А.Л., Дельник А.Е. (Киев) Различные соотношения теории пластического течения в задачах физически нелинейного деформирования грунтов оснований	107
Сахаров А.С., Гондляр А.В., Данг Хну Кун, Козак А.Л. (Киев), Большие перемещения упруго-пластических оболочечных систем с учетом трещинообразования	109
Синицын А.П. (Москва), Риск разрушения неопределимых конструкций после образования пластических шарниров.	III
Сокольский С.В., Лаврентьев Ф.Ф., Салита О.П. (Харьков) Неустойчивость пластического течения в монокристаллах цинка и его связь с неустойчивостью структурного состояния	II2
Содлертинская Е.С., Даньшина Л.Г., Дanelия Г.В., Цыпин М.И. (Москва), Критерий устойчивости и пластичность сплавов системы медь-галлий	II3
Стрельцов В.А., Эфрос Б.М. (Донецк), Делокализация пластической деформации в молибдене при высоких давлениях.	II5
Супрун А.Н. (Горький), Об одном варианте феноменологической модели реономной пластичности металлов	II7
Улитин В.В. (Ленинград), Несущая способность пологой цилиндрической панели при больших закритических деформациях	II9

Уманский С.Э., Романченко С.А. (Киев), Смятченно-смешанные схемы МКЭ в задачах теории пластичности	121
Фавстов Д.К., Меньшиков А.З., Ивкушкин В.А. (Куйбышев, Москва), Формирование текстуры никелида титана при термоциклировании	123
Фавстов Д.К., Ивкушкин В.А., Ермаков В.М. (Куйбышев, Москва), Эффект памяти формы в сплавах на основе никелида титана легированных гафнием	124
Фристов С.А., Иголкина Л.С., Косачев Л.С. (Киев, Подольск), Особенности высокотемпературной деформации малолегированных сплавов на основе молибдена и вольфрама	125
Фристов С.А., Саржан Г.Ф., Подрезов Д.Н. (Киев), Структура и прочность спеченных материалов	179
Фоменко Л.С., Дубенец С.В., Старцев (Харьков), Сверхупругое и необратимое двойникование монокристаллов сплавов индий-свинец	126
Хайнанов Ш.Х. (Уфа), Уравнения теории пластичности при односкоростном потоке дислокаций	127
Ханнус С.Х. (Тарту), Расчет пластических цилиндрических оболочек при больших прогибах	180
Цатурова Д.С. (Киев), Применение метода двух функционалов при решении нелинейных задач пластичности	128
Цыпин М.И., Дanelия Г.В., Соллертинская Е.С., Комник С.Н. Демирский В.В., Старцев В.И. (Москва, Харьков), Пластичность и упрочнение меди и твердых растворов на ее основе при низких температурах	130
Цыпин М.И., Дanelия Г.В. (Москва), Циклическое упрочнение чистой меди при высокотемпературной деформации..	131
Черноглазова Т.В., Мофа Н.Н., Пресняков А.А. (Алма-Ата), Роль локализации деформации в проявлении масштабного эффекта у пластичных металлов	132
Чижик А.А., Ланин А.А. (Ленинград), Трещиностойкость материалов в условиях релаксации напряжений	181

Чирас А.А., Данюнас А.А. (Вильнюс), Математические модели задачи анализа упругопластических пластин	I34
Шаблій О.Н., Гарапюк Т.Р. (Тернополь), Оптимальное управление вязко-упруго-пластическим деформированием твердых тел	I35
Шамардин А.Б. (Камышин), Способ решения упруго-пластических задач при силовом нагружении сварных конструкций	I37
Шведе А.И. (Рига), Применение вариационного принципа для численного расчета процесса динамического деформирования квадратной жесткопластической пластины ...	I39
Шудегов В.Е., Бектышева О.Н. (Ижевск), Дисклинационная структура и пластичность металлических стекол	I41
Янкевич М.А. (Киев), Влияние распора на несущую способность оконтуренных железобетонных плит	I42

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ X СЕМИНАРА "АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ПРОЧНОСТИ" 23-26 АПРЕЛЯ 1985 Г.

На русском языке.

Тартуский государственный университет,
СССР, 202400, г.Тарту, ул.Динкооли, 18.

Ответственный редактор Г. Оленев.

Корректор С. Оленева.

Подписано к печати 18.03.1985.

МВ 03532.

Формат 60x84/16.

Бумага ротаторная.

Машинопись. Ротапринт.

Условно-печатных листов II,39.

Учетно-издательских листов 8,77, Печатных листов I2,25.

Тираж 250.

Заказ № 270.

Цена 60 коп.

Типография ТГУ, СССР, 202400, г.Тарту, ул.Пялсона, 14.